

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES

DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Réseaux Electriques et Haute Tension

THÈME

Couplage d'une machine synchrone au réseau

Préparé par : M BOUKRARA Ahmed
M GHEDIRA Ahmed

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Qualité
Mr, M.MOUDJAHED	Professeur	Président
Meme,M.BEDOUI	MAA	Examinatrice
Meme,K.BELHACEL	MAA	Encadreur

Dédicaces

Nous dédions ce travail à tous nos gens nos pères et mères

Pour nos frères et sœurs

Pour tous nos amis

Du primaire à l'université

Pour tous ceux qui nous ont aidés dans ce travail

De près ou de loin

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier l'université "Ibn Khaldoun "de TIARET, spécialement le département de Génie électrique et tous nos enseignants.

Nous adressons également nos remerciements à Mr le président du jury et Mrs les membres du jury pour avoir accepté d'examiner et de juger notre travail.

*Comme, nous exprimons notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre encadreur **Md.Belhacel Kheira** , pour la qualité de son encadrement et pour nous avoir dirigé durant la période de préparation de notre mémoire de Master.*

Sommaire

Sommaire

Remerciements	
Introduction Général	01
Chapitre I : l'état de l'art des machines synchrones	
I.1. Introduction.....	03
I.2. Bref historique sur les machines électriques.....	03
I.3. Aperçu sur les évolutions technologiques des machines synchrones	04
I.4. Le bobinage de la machine	05
I.4.1. Les bobinages à pas diamétral	06
I.4.2. Les bobinages à pas raccourci.....	06
I.4.3. Les bobinages répartis réguliers.....	07
I.4.4. La supraconductivité.....	07
I.5. Echauffement et refroidissement des machines	08
I.5.1. Echauffement et techniques d'isolation	08
I.5.2. Le refroidissement des machines électriques.....	09
I.6. Classification des machines synchrones	10
I.6.1. Le refroidissement des machines électriques.....	10
I.6.2. Machines Synchrones à rotors bobinés à pôles lisses	10
I.6.3. Machines Synchrones à rotors bobinés à pôles saillants.....	11
I.6.4. Généralités sur les machines électriques à aimants permanents	11
I.6.5. Machines à double excitation.....	13
I.6.6. Machines à réluctance variable	13
I.7. Définition du système d'excitation	15
I.7.1. Fonctions devant être assurées par le système d'excitation.....	15
I.7.2. Description des différentes sortes de sources de puissance	15
I.8. Champ tournant.....	16
I.9. Modes de fonctionnement.....	17
I.9.1. Fonctionnement en alternateur.....	17
I.9.2. Fonctionnement en moteur	17
I.10. Synchronisme.....	17
I.11. Conclusion	17

Chapitre II : Moteur synchrone

II.1. Introduction	18
II.2. Constitution	18
II.3. Types des moteurs synchrones	20
II.3.1. Moteurs synchrones à rotor excité.....	20
II.3.2. Moteurs synchrones à rotor non excité ou à réluctance.....	21
II.4. Principe de fonctionnement.....	22
II.4.1. Modèle équivalent d'une phase	23
II.4.2. Démarrage du moteur synchrone.....	24
II.5. Moteur en charge – description	25
II.5.1. La création du couple électromagnétique.....	25
II.5.2. Calcul du couple électromagnétique.....	26
II.6. Bilan des puissances	27
II.7. L'avantage du moteur synchrone	28
II.8. Couplage sur un réseau de fréquence fixe	29
II.8.1. Couplage sur un réseau en moteur asynchrone.....	30
II.8.1.1.Principe.....	30
II.8.1.2.Fonctionnement en moteur asynchrone.....	30
II.8.2.Procédure de couplage.....	31
II.9. Les compensateurs synchrones.....	32
II.10. Moteur Synchrone Autopiloté	33
II.10.1. Schéma de principe.....	33
II.10.2. Avantages du moteur brushless	33
II.10.2.1. Caractéristiques générales	33
II.10.2.2. Caractéristiques dynamiques et statiques	33
II.10.3. Inconvénients du moteur brushless.....	34
II.10.3.1. Caractéristiques générales	34
II.10.3.2. Caractéristiques dynamiques et statiques	34
II.11. Domaine de fonctionnement.....	34
II.12. Stabilité	35
II.13. Conclusion.....	36

Chapitre III : Alternateur synchrone

III.1. Introduction	37
---------------------------	----

III.2. Création de forces électromotrices triphasées	37
III.3. Constitution – Principe – Excitation	37
III.3.1. Constitution	37
III.3.2. Principe.....	40
III.3.3. Excitation de la machine	40
III.4. Modèle équivalent de l'enroulement du stator	41
III.4.1. Modèle de l'induit	41
III.4.2. Modèle de l'inducteur	41
III.4.3. Réaction magnétique d'induit	42
III.5. Bilan des puissances d'un alternateur	42
III.6. Fonctionnement en génératrice	44
III.6.1. Relation entre vitesse de rotation et fréquence des tensions et courants avec : $f = pn$	44
III.6.2. Etude de l'alternateur.....	45
III.6.3. La mesure indirecte	48
III.6.3.1. Diagramme de Behn – Eschenburg.....	48
III.6.3.2. Le diagramme de potier.....	52
III.6.3.3. Le diagramme de Blondel.	53
III.7. Expression du couple	55
III.8. Fonctionnement dans les quatre quadrants	55
III.9. Détermination des éléments du schéma équivalent.....	56
III.10. Caractéristiques d'un alternateur.....	57
III.11. L'amélioration des caractéristiques des alternateurs.....	58
III.12. Conclusion.....	58

Chapitre IV : Etude expérimentale sur la machine synchrone

IV.1. Introduction	59
IV.2. Objectifs	59
IV.2.1. Fonctionnement sur réseau fixe (fréquence et valeur efficace des tensions statoriques)	
IV.2.2. Schéma de câblage	59
IV.2.3. Mode opératoire	60
IV.3. Circuit à réaliser	61
IV.4. Etude d'un alternateur par la maquette didactique.....	63
IV.4.1. Matériel utilisé dans cette manipulation	64
IV.4.2. 1 ^{ère} expérience	65

IV.4.3. 2 ^{ème} expérience	67
IV.4.4. 3 ^{ème} expérience	69
IV.5. Couplage d'une machine synchrone au réseau	71
IV.5.1. Protocole	71
IV.5.2. Conditions de couplage	71
IV.5.3. La vérification que l'ordre de succession des phases est correct	73
IV.5.4. Couplage de synchronisation	75
IV.6. Comportement sur le réseau fixe	76
IV.7. Le protocole pour coupler l'alternateur au réseau.....	79
IV.8. caractéristique de réglage	80
IV.9. Augmentation de la puissance active fournie par l'alternateur au réseau	80
IV.10. Diminution de la puissance active fournie par l'alternateur au réseau	81
IV.11. La réglage de la puissance réactive fournie au réseau	81
IV.11.1 Fonctionnement génératrice	82
IV.11.2. Conclusion sur le contrôle des transferts d'énergie réactive.....	82
IV.12. Le protocole à suivre pour découpler l'alternateur et mettre à l'arrêt le système.....	82
IV.13. Avantages et inconvénients de couplage	83
IV.14. Conclusion	83
Conclusion générale.....	84
Bibliographie.....	85
Liste des Tableaux	I
Liste des Figures.....	II
Listes des Symboles et Acronymes	V

Introduction générale

Introduction générale

Les machines synchrones sont très largement représentées et occupent une place sans cesse croissante. Elles regroupent une très grande variété de structures qui ont cependant en commun un principe immuable : le synchronisme indispensable entre la fréquence des courants d'alimentation et le mouvement relatif de la partie fixe par rapport à la partie mobile. En fonctionnement générateur à fréquence fixe, elles sont exploitées depuis plus d'un siècle. Parmi les nombreuses qualités qui ont fait leur succès, citons : un rendement naturellement supérieur à celui des autres machines, une capacité à régler la puissance réactive et une très grande liberté de conception [1].

La demande de l'énergie électrique ne cesse d'augmenter jour après jour, à cause de l'accroissement de l'industrialisation et la croissance de la population et avec le manque de ressources d'énergie, le coût de production de l'énergie électrique devient très élevé. [2].

L'objectif de notre travail est d'étudier le comportement de l'alternateur synchrone en fonctionnement isolé au raccordement d'une charge ohmique , inductive et capacitive, ainsi d'effectuer le couplage d'une machine synchrone au réseau .Notre mémoire s'article au tour de quatre chapitres. Dans le premier chapitre nous exposons l'état de l'art des machines synchrones.

Le deuxième chapitre a été consacré à l'étude des machines synchrones en mode fonctionnement moteur.

Le troisième chapitre. porte sur le comportement de l'alternateur synchrone en fonctionnement isolé.

Dans la dernière partie du travail nous avons effectué le couplage d'une machine synchrone au réseau, juste après avoir identifié la machine synchrone.

En fin, nous terminons notre travail par une conclusion générale.

L'état de l'art des machines synchrones

I.1. Introduction

Les machines synchrones jouent un rôle prépondérant dans la conversion électromécanique de l'énergie du fait que la quasi-totalité des machines tournantes produisant l'énergie électrique à partir de l'énergie mécanique sont des machines synchrones, appelées alternateurs dans ce cas d'utilisation. La raison de cette utilisation préférentielle réside surtout de la possibilité de construire des machines synchrones de très grande puissance unitaire. Des machines synchrones peuvent également être choisies pour d'autres usages: moteurs synchrones, compensateurs, etc. [3] Dans ce chapitre nous allons présenter l'état de l'art des machines synchrones.

I.2. Bref historique sur les machines électriques

Avant de nous étaler aussi longuement que nous le souhaitons sur la machine synchrone, il convient de faire un petit détour sur les prémices de cette machine combien importante et intéressante dans notre vie de tous les jours.

Nous pouvons affirmer sans trop nous tromper que l'histoire des machines électriques débute avec le professeur Pacinotti (1841-1912) qui effectua des travaux sur un anneau tournant dans un champ magnétique. Dans cette expérience, bien que restée au stade expérimental, il a envisagé une utilisation en mode générateur et moteur. Cependant certaines voix se sont levées pour réfuter cette théorie car l'effet magnétique du courant électrique a été découvert un peu plus tôt par Oersted en 1820 et l'induction magnétique par Faraday en 1831 [4].

En 1869, le belge Zénobe Gramme réalisa les premières génératrices à courant continu en imaginant le collecteur. Ses travaux furent présentés à l'Académie des Sciences de Paris et cette première machine a reçu le nom de machine de Gramme dont une photo est donnée par Fig.I.1.

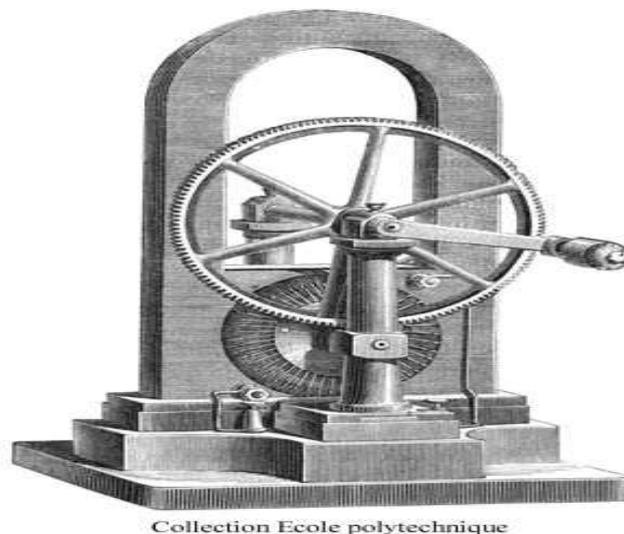


Fig. I.1 : Machine de Gramme

En 1887 Nikola Tesla (1856-1943), ingénieur yougoslave en électronique, né en Croatie, fonde une société de construction d'alternateurs.

Grâce à ses travaux, le courant alternatif gagne la bataille du transport à distance et son utilisation va se trouver profondément bouleversée.

C'est ainsi que la première expérience de transport d'électricité s'est faite dans les années 1890 vers l'Allemagne sur une distance de 175 km avec un rendement de 75 %. Tesla préconise d'abord l'utilisation des courants polyphasés et réussit à créer un champ magnétique tournant qui permet d'entraîner en rotation une armature mobile tournante. L'invention du moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil intervient.

en 1889 grâce à l'électricien Russe Michail Ossipowitsch Doliwo-Doborwolski. Cette machine ne sera construite industriellement que deux ans plus tard. La paternité de cette invention est contestée et souvent attribuée à Tesla.

Ainsi, avant le début du vingtième siècle la plupart des machines électriques que nous connaissons actuellement avaient été mises en œuvre ou leur principe avait été déjà posé.

Les machines synchrones, asynchrones et à collecteur constituent l'essentiel du parc des machines électriques depuis un siècle et demi. Cependant, le domaine des machines électriques n'est pas resté figé. Depuis la découverte du transistor en 1948 et du thyristor en 1958, des progrès immenses ont été effectués dans ce domaine conduisant à d'importants développements théoriques et technologiques.

Au-delà de leur conception qui est quasi standardisée, il convient de savoir dans quelle mesure ces machines peuvent être exploitées au meilleur de leurs performances. Cela passe non seulement par une meilleure connaissance du système mais surtout par une élaboration de lois de commande adaptées.

I.3. Aperçu sur les évolutions technologiques des machines synchrones

Depuis l'invention de la machine de Gramme dans les années 1870, des améliorations technologiques n'ont jamais cessé afin d'accroître les performances des machines électriques. Ces améliorations sont de plusieurs ordres pour ce qui est des génératrices synchrones : excitation, structure mécanique, mode de régulation, etc. Les constructeurs ont toujours essayé dans la mesure du possible de rendre leurs machines fiables vis-à-vis des pannes et de certaines conditions de fonctionnement. Le second point d'amélioration que nous pouvons citer est le prix. En effet, compte tenu de la part importante des matériaux dans la fabrication des machines, des techniques ont été développées afin de réduire cette part et donc le coût global de la machine. Enfin notons que,

malgré cette réduction de matière, l'accent mis sur les performances des machines n'a pas été négligé.

Ceci a conduit à des machines plus efficaces en termes de rendement, de tenue tension, de qualité de signaux, etc. Dans cette partie, nous montrerons une liste non exhaustive des évolutions qui ont été apportées sur les machines électriques et surtout sur la machine synchrone.

I.4. Le bobinage de la machine

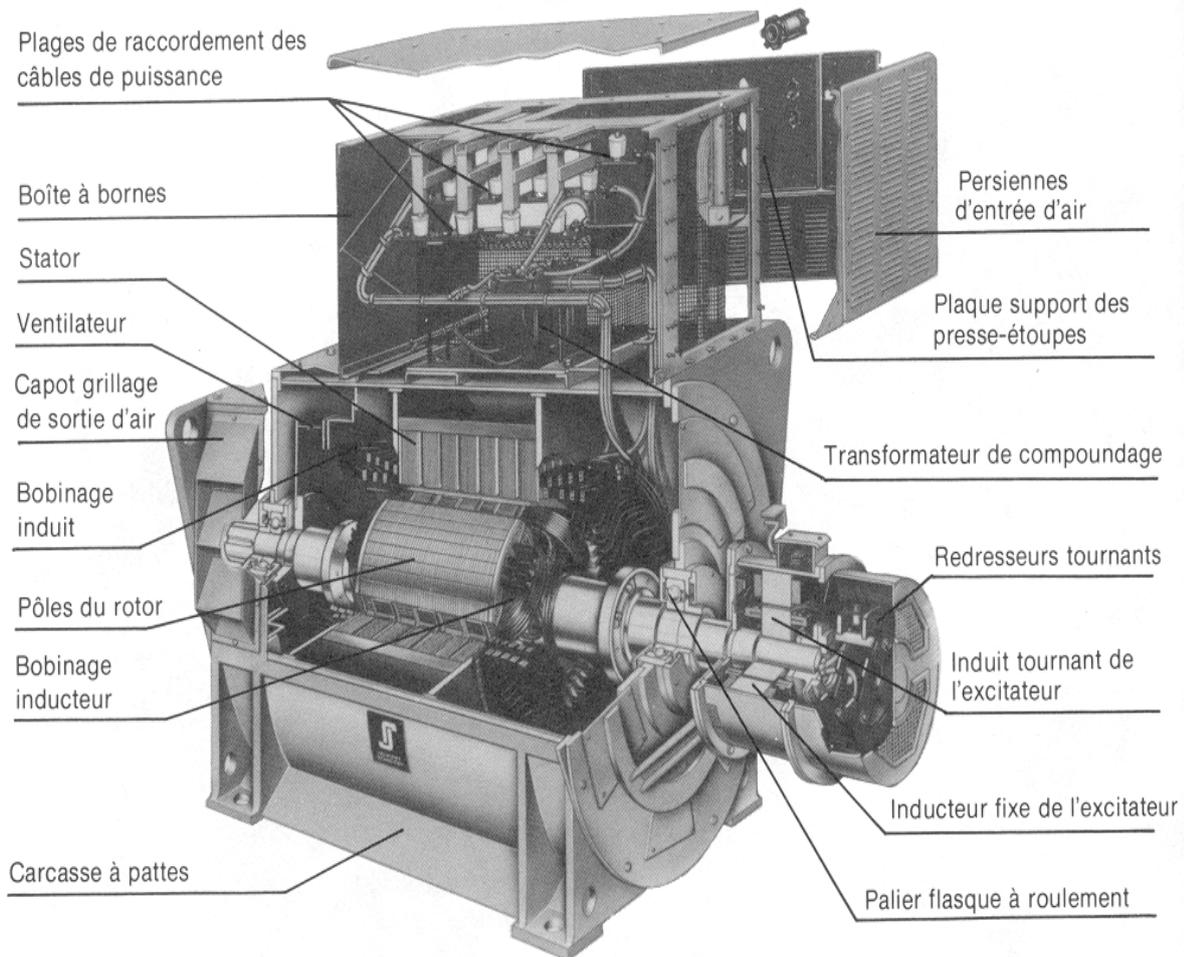


Fig. I.2 : Description de la machine synchrone

Avec le développement des algorithmes de calcul par éléments finis, et surtout l'utilisation de logiciels dédiés tels que Flux2D ou Flux3D, une meilleure connaissance et un meilleur design des machines sont faits. On est donc arrivé à un dimensionnement adéquat des têtes de bobines pour un meilleur refroidissement, des encoches où sont logées les bobines et des amortisseurs qui ont un rôle prépondérant dans le fonctionnement global (stabilité) des machines et qui.

En cas de court-circuit sur une génératrice synchrone, fournissent un chemin privilégié aux forts courants dans le but d'éviter une surtension dans l'inducteur et par conséquent une surchauffe anormale de la machine. [5]

En ce qui concerne le bobinage de la machine, les industriels ont réalisé de nombreuses avancées. Ces dernières ont été indispensables, car du type de bobinage utilisé, dépendent coût, rendement, refroidissement, isolation,... de la machine [6]. C'est ce dernier point que nous développerons dans cette section.

I.4.1. Les bobinages à pas diamétral

Ce type de bobinages est très utilisé dans le monde industriel. Avec cette technologie, dans chaque encoche, on ne trouve que des conducteurs d'une même phase qui y sont logés. En outre, compte tenu du pas diamétral toutes les encoches d'une même phase sont consécutives. Il est déconseillé dans cette structure d'avoir un nombre d'encoches par phase inférieur à deux (2). Le gros avantage de ce type de bobinage est sa facilité d'automatisation qui permet de réduire le coût de la main d'œuvre.

I.4.2. Les bobinages à pas raccourci

Contrairement au bobinage à pas diamétral, celui-ci peut comporter plusieurs conducteurs de deux phases différentes dans une même encoche comme le montre la figure. I.3.

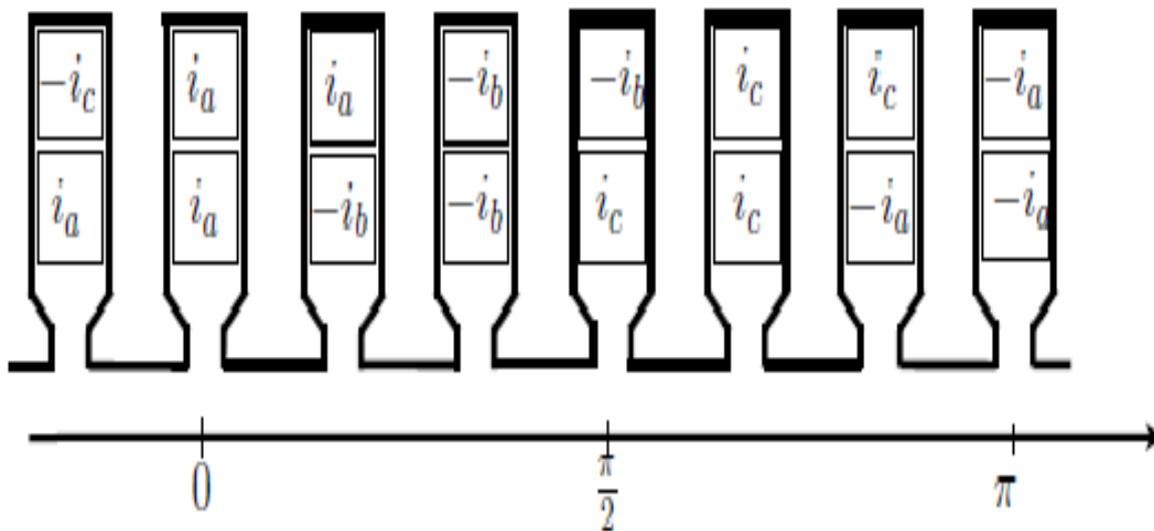


Fig. I.3 : Bobinage à pas raccourci : cas d'une machine à 12 encoches au stator ($p=2$).

Ceci a pour conséquence de réduire sensiblement les harmoniques présents dans les signaux de sortie. C'est cette technologie qui est utilisée lorsque l'on veut éliminer les harmoniques 3 ou 5 ou 7... Cependant, elle ne permet pas d'éliminer simultanément deux harmoniques, mais plutôt de les réduire.

I.4.3. Les bobinages répartis réguliers

Bien que le bobinage à pas raccourci donne des résultats intéressants, l'élimination des harmoniques n'est généralement pas effectuée efficacement. Il convient donc de modifier la répartition des conducteurs dans les encoches comme la montre figure. I.4.

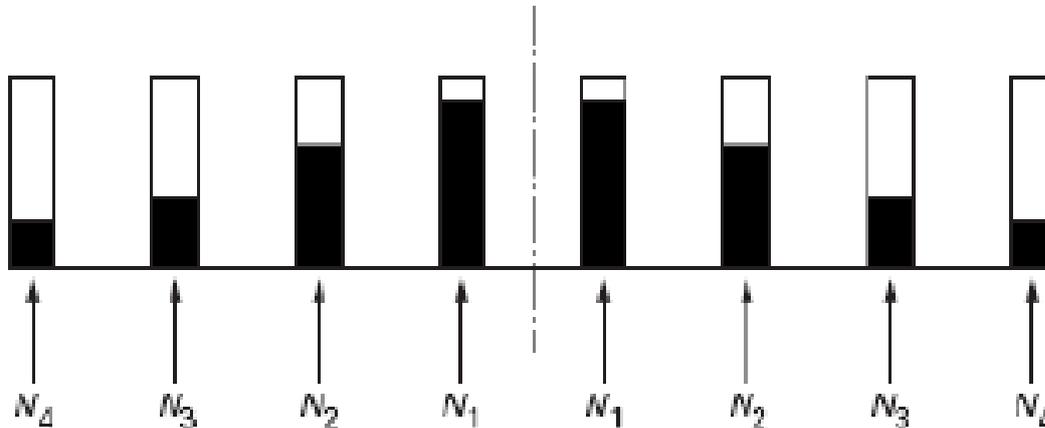


Fig. I.4 : Bobinages repartis réguliers d'après [4]

On voit bien avec cette structure que le nombre de conducteurs dans une encoche est variable, ceci donne plus de degrés de liberté quant à l'élimination, du moins la réduction importante des harmoniques. Cette configuration se présente comme celle qui fournit le meilleur taux de distorsion pour les machines synchrones bobinées et l'optimisation de la méthode se fait par un calcul des coefficients de bobinage adéquats dont la théorie dépasse le cadre de notre étude.

I.4.4. La supraconductivité

La supraconductivité peut être considérée comme la toute dernière innovation dans le domaine du bobinage des machines synchrones. Un supraconducteur [7,8] est un matériau dont la résistance devient négligeable dès que sa température est en dessous d'une certaine valeur dite température critique. Comme dans ces matériaux, il n'y a aucune perte d'énergie, une application dans le domaine des machines électriques est faite depuis ces dernières décennies. Dans ces machines, le fil de cuivre est remplacé par des supraconducteurs capables de transporter le courant électrique sans dissipation d'énergie. De nos jours, il existe des machines synchrones dont le bobinage est entièrement supraconducteur dont l'inducteur est souvent en aimants permanents.

Le supraconducteur sert à augmenter les performances, car, grâce à son absence de résistance électrique, des courants très élevés peuvent être utilisés. Cependant, l'inconvénient majeur est le refroidissement des éléments supraconducteurs. Ceci nécessite l'utilisation d'un cryostat (générateur de très basses températures) qui a pour conséquence d'augmenter la taille de l'entrefer.

Compte tenu de ce problème, des recherches sur des supraconducteurs plus « chauds » sont en cours car en l'état actuel des choses, il n'est pas économiquement rentable de produire des machines électriques supraconductrices à grande échelle.

I.5. Echauffement et refroidissement des machines

I.5.1. Echauffement et techniques d'isolation

Depuis très longtemps l'échauffement, dont les machines électriques sont le siège, a occupé une place de choix dans les travaux des fabricants de machines [9]. Compte tenu de la rotation, des frottements ainsi que les courants dans les enroulements, la génératrice synchrone est le siège d'une grande production de chaleur.

Il convient donc, afin d'assurer la fiabilité des machines électriques, de limiter cet échauffement. La tâche la plus difficile et la plus importante est la bonne tenue en température de l'isolation des enroulements qui peut se dégrader pour des températures de fonctionnement élevées [10,11]. L'isolation des machines électriques se fait avec des matériaux pouvant être divisés selon leur tenue en température en classes Y, A, E, B, F, H et C. Le tableau I-1 donne les détails relatifs à ces classes.

Tableau I.1 : Classe d'échauffement et isolation des machines électriques

Classe	Température maximale	Isolants
Y	90°C	fibres en cellulose, soie et papier non imprégnés.
A	105°C	fibres en cellulose, soie et papier imprégnés dans un isolant tel que l'huile.
E	120°C	pellicules organiques synthétiques.
B	130°C	mica, fibre de verre, amiante avec liants organiques respectant la tenue de température de 130°C.
F	155°C	matériaux à base de mica, verre, amiante, etc.
H	180°C	mica, fibre de verre, amiante combinés à des silicones.
C	>180°C	porcelaine, verre, quartz sans liants organiques.

L'isolation des toutes premières machines électriques était faite en coton imprégné, ce qui limitait la température de fonctionnement à une centaine de degrés. Grâce à la technologie utilisée à l'heure actuelle, l'isolation des machines en supporte beaucoup plus comme c'est le cas de celle que nous utilisons dans notre étude qui est de classe H [12].

L'isolation peut être réalisée de plusieurs manières :

– L'isolation élémentaire :

Il s'agit d'isoler chaque spire en fonction de la tension qui peut apparaître entre les spires en régime permanent ou transitoire. Cette isolation s'effectue en utilisant de l'émail, du verre, de polyester ou des combinaisons de ces matériaux.

– L'isolation de groupe :

Lorsque l'isolation élémentaire des spires est insuffisante pour supporter la tension entre celles-ci (tension $>2000V$), elle est complétée par une isolation de groupe. Celle-ci est généralement constituée d'un ruban de mica associé à de la laine de verre.

– L'isolation de la masse :

Il s'agit généralement d'un isolant en forme de U fabriqué en Nomex et dont la partie supérieure est fermée par un isolant de type verre.

Grâce à ces évolutions, les machines peuvent désormais être utilisées dans des conditions d'altitudes et climatiques assez défavorables. Bien que l'isolation soit une partie importante dans le design des machines, il faut noter que leur refroidissement a occupé une place non négligeable dans leur évolution.

1.5.2. Le refroidissement des machines électriques

Un accroissement excessif de la température peut influencer négativement sur le fonctionnement des machines électriques. Ainsi, les soudures, les isolants, les points de contact,... peuvent se dégrader. Il convient alors d'assurer, outre une bonne isolation, un refroidissement performant. Plusieurs techniques existent mais les plus importantes sont la ventilation et l'échange thermique.

– La ventilation

La base principale de cette technique est l'utilisation d'un ou de deux ventilateurs dont le but est d'évacuer vers l'extérieur, la chaleur présente dans certaines parties de la machine telles que le bobinage, l'entrefer, etc. La technique la plus anciennement utilisée dans le refroidissement des alternateurs est la ventilation axiale [13,14], qui présente un inconvénient, car les têtes de bobines situées en aval du flux sont refroidies par un air déjà chaud.

Afin d'améliorer l'efficacité du refroidissement d'autres techniques telles que la ventilation radiale ou axio-radiale ont vu le jour et ont permis d'améliorer les échanges thermiques et d'éviter les points chauds.

– L'échangeur thermique

Il est fait à base d'ailettes, de caloducs ou de tubes de cuivre dans lesquels circule un fluide: eau, hydrogène, etc.

Pour conclure cette section sur le problème thermique, notons que le but des industriels n'est pas de construire des machines qui s'échauffent peu, car ceci conduirait à des machines lourdes et onéreuses. La solution judicieuse qui a été adoptée est la construction des machines fiables, avec un rendement élevé (99%) et une durée de vie importante.

Il faut seulement garder en vue que la machine s'échauffera d'autant plus qu'elle sera moins bien refroidie et inversement. C'est pourquoi le problème du refroidissement a été et continue d'être au cœur des préoccupations des industriels. [15,16]

I.6. Classification des machines synchrones

I.6.1. Le refroidissement des machines électriques

Dans le cas des moteurs à rotors bobinés, le rotor supporte un bobinage monophasé alimenté par un courant continu tandis que le stator est équipé d'un bobinage polyphasé à courant alternatifs. L'obtention d'une valeur de couple moyen non nulle passe alors par la vérification de la condition de synchronisme qui impose une égalité stricte entre vitesse du champ tournant stator et vitesse du champ tournant rotor.

Afin de s'en parer des contacts glissants (bague balais) comme pour les machines à courant continu, les machines synchrones à rotor bobiné font appel, le plus souvent, à une excitatrice (ou alternateur d'excitation) associée à un redresseur tournant, pour éliminer tout contact glissant.

Cet alternateur auxiliaire dont l'induit est accouplé à l'arbre de la machine débite dans l'inducteur, par l'intermédiaire du pont redresseur à diodes tournant aussi avec l'arbre de la machine.

I.6.2. Machines Synchrones à rotors bobinés à pôles lisses

Plutôt adaptées pour des applications à forte puissance et grande vitesse, le bobinage est dans ce cas logé dans des encoches pratiquées dans la masse du rotor et fermées par des clavettes en acier amagnétique (Figure.I.5.b). Les têtes de bobines inductrices sont maintenues en place par des frettes en acier amagnétique. L'entrefer étant d'épaisseur constante, seule la répartition des encoches et /ou leur remplissage constitue un paramètre structurel jouant sur la forme d'onde des f.e.m attendues. Une disposition appropriée permet d'obtenir des f.e.m sinusoïdales à très faible taux d'harmoniques.

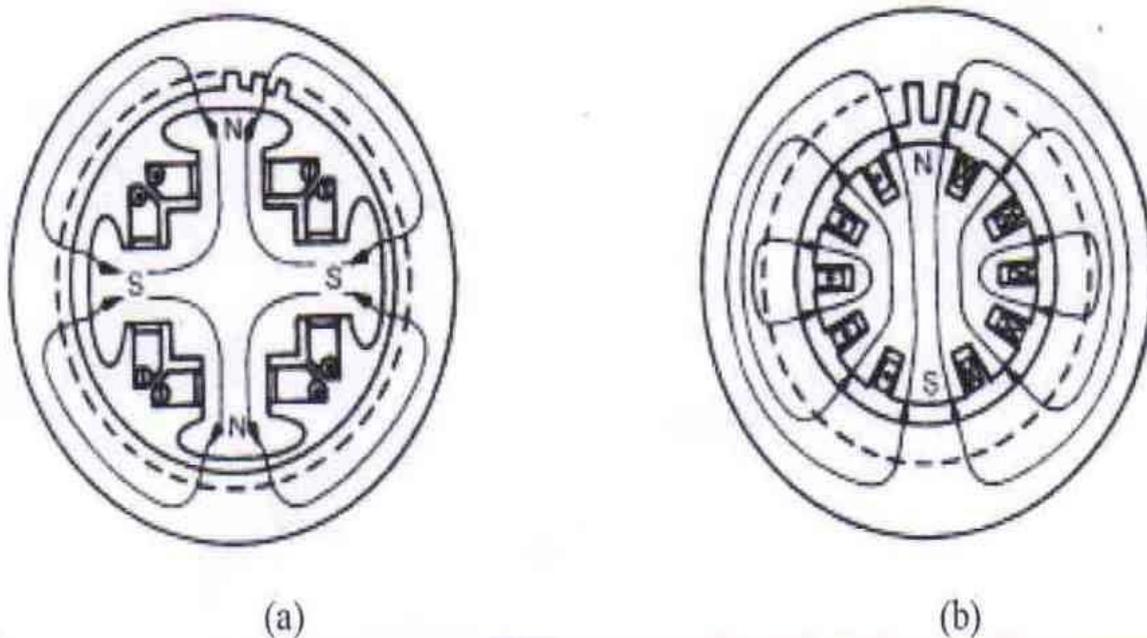


Fig. I.5 : Moteur synchrones à inducteur bobiné

a) rotor à pole saillants, b) rotor à pole lisses

I.6.3. Machines Synchrones à rotors bobinés à pôles saillants

Pour les machines à rotors à pôles saillants (Figure.I.5.a), les bobines inductrices sont montées autour de noyaux polaires massifs ou feuilletés.

Pour ces machines, le rotor est un électroaimant dont les pôles sont alternativement nord et sud. Les enroulements sont alimentés en courant continu, ils sont placés autour des noyaux polaires. Le nombre de pôles est toujours pair, il varie suivant la machine. Elles sont utilisées pour des applications qui nécessitent une simplicité de constitution.

Ce type de machine possède un facteur de puissance relativement faible qui impose un surdimensionnement des convertisseurs statiques, ceci est un inconvénient pour la l'alimentation à fréquence variable. Pour des applications de faible puissance aux environ de quelques kilowatts on peut s'affranchir de cette faiblesse de ce genre des machines.

I.6.4. Généralités sur les machines électriques à aimants permanents

Avec l'avènement des matériaux à aimants permanents de haute énergie et les progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, les moteurs à aimants permanents ont connu ces dernières années un grand essor.

Ils ont été adoptés dans de nombreuses applications de hautes performances telles que la robotique, l'aérospatiale, les outils électriques, la production des sources d'énergie renouvelables, les divers équipements médicaux, les véhicules électriques et hybrides, etc.

Pour toutes ces applications, les machines à aimants permanents sont parfois préférables aux autres machines traditionnelles, telles que les machines à courant continu, les moteurs synchrones classiques et les moteurs asynchrones et en particulier pour les applications spécifiques (servomoteur à vitesse variable). A titre d'illustration, quelques avantages des machines à aimants permanents, sont cités ci-dessous :

- L'absence d'enroulement rotorique annule les pertes joules au niveau du rotor.
- Le couple volumique et la puissance massique importants permettent une meilleure compacité.
- L'absence des collecteurs et des balais simplifie la construction et l'entretien.
- La densité de flux, relativement élevée dans l'entrefer, assure une très bonne performance dynamique.

De plus, les machines à aimants permanents (brushless) sont capables de fonctionner avec un facteur de puissance proche de l'unité. Le contrôle précis et rapide du couple, de la vitesse et de la position est possible avec un simple onduleur de tension triphasé.

Selon les principes de fonctionnement, les machines à aimants permanents peuvent être classées en trois types :

- Les machines à courant continu et aimants permanents (MCC).
- Les machines à aimants permanents sans balais (MAPSB).
- Les machines synchrones à aimants permanents sans balais (MSAP).

La figure.I.6. montre la configuration de ces trois types.

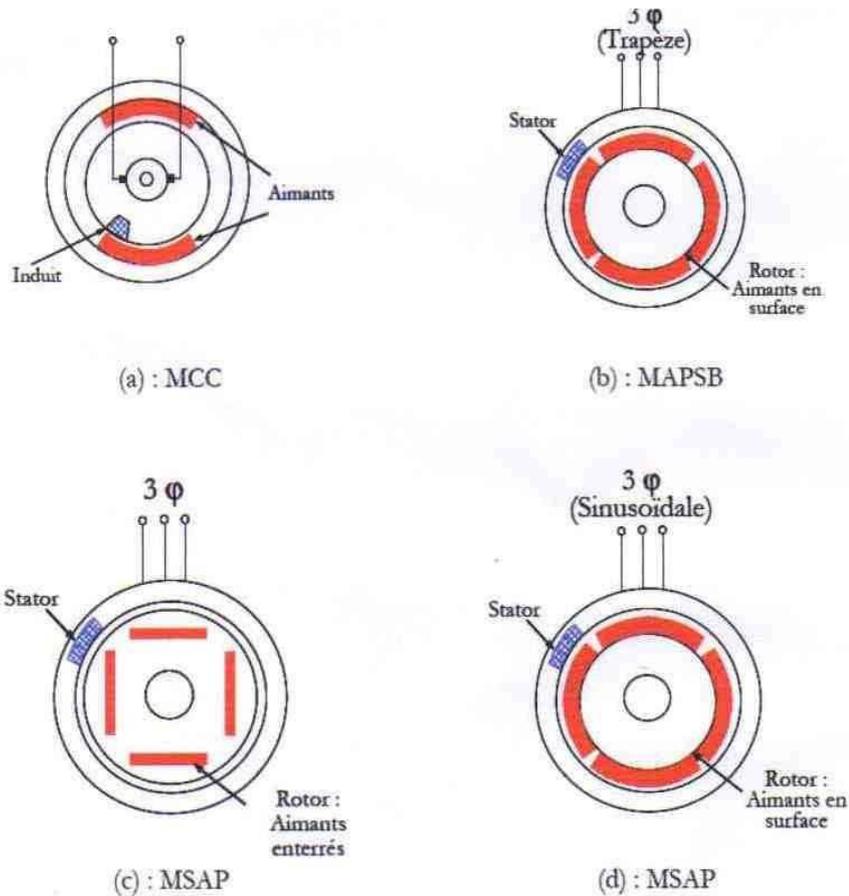


Fig. I.6 : Structure des machines à aimants permanents [17]

I.6.5. Machines à double excitation

Ces machines peuvent combiner les principes de tous les types de machines existantes. On peut ainsi trouver un très grand nombre de structures envisageables que nous ne détaillerons pas. Pour plus d'informations sur ces machines hybrides particulières, on peut se référer aux travaux du Laboratoire d'Electricité Signaux et Robotique (LESiRSATIE) et en particulier aux études.

I.6.6. Machines à réluctance variable

On peut trouver toutes sortes de machines à réluctance variable. D'ailleurs, Miller les considère comme des machines à aimants permanents internes dont le flux de l'aimant serait nul. Cela permet de mettre en commun toutes les structures de machines à aimants et toutes celles à réluctance variable.

La plupart des auteurs traitant des machines à aimants internes sont des références pour les machines à réluctance variable. Citons Miller et LIPO pour l'exemple. Les dernières études, visant à augmenter le rapport de saillance, se sont tournées vers les machines à rotor laminé axialement.

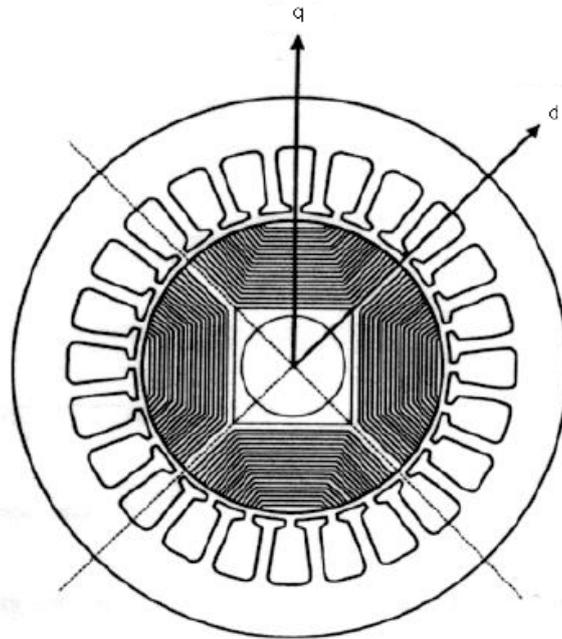


Fig. I.7 : Machine à réluctance variable laminée axialement

Néanmoins, les machines à double saillance (stator et rotor) classiques sont toujours d'actualité. En France, ce domaine fait partie des travaux de prédilection du LESiR (cité auparavant) qui a permis à la société Valeo Systèmes Electriques de réaliser un alerno-démarrreur de ce type (figure.I.8.).

Les machines à réluctance variable se comportent d'autant mieux que leur rapport de saillance est élevé. Dans la littérature, BOLDEA a réussi à réaliser une machine dont le rapport de saillance atteint 20 mais la plupart des machines ont un rapport de saillance compris entre 5 et 14 ($5 < \zeta < 14$).



Fig. I.8 : Rotor d'une machine à réluctance variable à double saillance alerno-démarrreur Valeo-LESiR. [18]

I.7. Définition du système d'excitation

Le courant d'excitation des machines synchrones est obtenu à partir d'un ensemble appelé système d'excitation comportant, dans la majorité des cas :

- la source de puissance proprement dite, fournissant la puissance d'excitation.
- le régulateur de tension, servomécanisme ayant, dans le cas le plus simple, pour grandeur de sortie une tension commandant la puissance délivrée par la source d'excitation et, pour grandeur d'entrée, l'écart entre la tension aux bornes de la machine synchrone principale et une tension de consigne.
- éventuellement, des étages amplificateurs intermédiaires, intercalés entre le régulateur et la source de puissance.

I.7.1. Fonctions devant être assurées par le système d'excitation

Le système d'excitation des machines synchrones est amené à jouer un rôle important dans deux catégories de circonstances :

- d'une part, il assure le réglage de tension dans les conditions normales de fonctionnement, c'est-à-dire lorsque les conditions extérieures appliquées, et notamment la tension aux bornes, ne varient pas avec simultanément une grande amplitude et une grande rapidité. On considère dans ce cas le comportement du système d'excitation vis-à-vis des petites perturbations ;
- d'autre part, il contribue au rétablissement de conditions normales de fonctionnement, à la suite de variations brutales et de grande amplitude, des conditions extérieures appliquées, et notamment de la tension aux bornes. On considère alors le comportement du système d'excitation vis-à-vis des grandes perturbations.

I.7.2. Description des différentes sortes de sources de puissance

Pour fournir le courant continu d'excitation d'une machine synchrone, Il est nécessaire de disposer d'une source de tension continue, variable dans d'assez larges proportions, puisque, entre le fonctionnement à vide et le fonctionnement en régime nominal, le courant d'excitation d'une machine à pôles saillants varie environ du simple au double et, dans le cas d'une machine à entrefer constant, il peut varier environ du simple au triple. Dans l'étude du système d'excitation intervient donc, d'une part, le choix des sources d'excitation, objet du présent paragraphe, et d'autre part, les moyens mis en œuvre pour faire varier le courant d'excitation.

On peut distinguer trois grandes catégories de sources principales d'excitation :

- excitatrice à courant continu.
- alternateur-exciteur débitant sur redresseurs.

— redresseur alimenté directement à partir des bornes de la machine synchrone principale (auto-alimentation).

Toutes ces sources tirent leur énergie de la machine synchrone, soit sous forme mécanique à partir de la ligne d'arbre dans les deux premiers cas, soit directement sous forme électrique dans le troisième.

Les catégories excitatrice et alternateur-excitateur nécessitent une source secondaire de puissance pour exciter ces machines intermédiaires.

Le choix de cette source secondaire, bien que de plus bas niveau, est également important, notamment pour les caractéristiques d'autonomie de l'équipement.

La source secondaire peut être constituée :

— d'un redresseur alimenté à partir des bornes de la machine synchrone principale (auto-alimentation) comme une source principale :

— d'un alternateur à aimant permanent monté sur la ligne d'arbre en plus de la machine d'excitation principale :

— d'une source électriquement indépendante, ce qui en réalité est rare, un lien existant souvent entre la source dite indépendante et l'alternateur à exciter. [19]

I.8. Champ tournant

Théorème de Ferraris (1988)

Si on alimente par des tensions triphasées équilibrées un ensemble de p bobines par phase (p paires de pôles par phase) décalées angulairement de $2\pi/p$ radians les unes par rapport aux autres, alors ces bobines produisent un champ magnétique d'amplitude constante et qui tourne à la vitesse $n_s=f/p$. avec f fréquences des tensions alimentant les bobines.

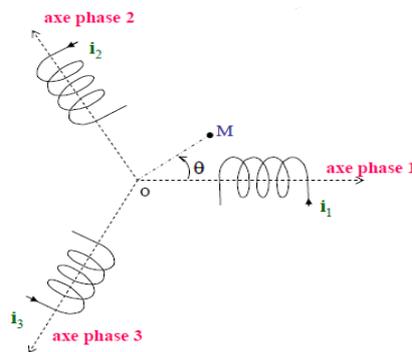


Fig. I.9: production de champ tournant.

$$b_M(\theta, t) = \frac{3}{2} \cdot K \cdot I X_s = \sqrt{2} \cos(\omega t - \theta)$$

I.1

I.9. Modes de fonctionnement

I.9.1. Fonctionnement en alternateur

L'inducteur sur le rotor entraîné par une turbine tournant à la vitesse n_s , crée dans l'entrefer de la machine un champ tournant à la vitesse n_s . Ce champ tournant induit aux bornes de l'induit (stator) une f.e.m $e(t)$ de fréquence f (la loi de Faraday).

I.9.2. Fonctionnement en moteur

Les courants alternatifs de fréquence f dans l'induit (stator) créent dans l'entrefer de la machine, un champ magnétique tournant à la vitesse n_s . Le rotor, siège d'un champ magnétique constant, suit le champ tournant à la même vitesse n_s .

I.10. Synchronisme

Le rotor et le champ tournant ont la même vitesse n_s . On dit qu'ils sont synchrones (d'où l'indice s de n_s). La fréquence f de la f.e.m. ou du courant de l'induit (stator) et la vitesse de synchronisme n_s sont liées par la relation :

$$n_s = \frac{f}{p} \quad \text{I-2}$$

avec

n_s : vitesse de rotation du champ tournant en trs.s⁻¹.

f : fréquence des courants alternatifs en Hz.

p : nombre de paires de pôles. [20]

I.11. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation de l'état de l'art des machines synchrones. Après un bref aperçu sur l'historique des machines électriques, nous sommes intéressés aux différentes évolutions technologiques tant sur la structure que sur les performances de la machine synchrone. C'est ainsi que différents types de bobinages et des méthodes de refroidissement des machines ont été présentées. Par la suite, les classifications et systèmes d'excitation des machines synchrones. On termine ce chapitre par le principe et les modes de fonctionnement des machines synchrones. Dans le prochain chapitre exposé en détail le moteur synchrone.

Chapitre II :

Moteur synchrone

II.1. Introduction ,

Les machines de type synchrone représentent aujourd'hui une part importante du marché des convertisseurs électromécaniques d'énergie et couvrent une gamme de puissance très large qui s'étend de quelques MW, jusqu'à 1GW environ. Traditionnellement, les fortes puissances restent le domaine réservé de la production d'électricité. En fonctionnement moteur, en revanche, les puissances installées dépassent rarement quelques dizaines de MW. [21].

II.2. Constitution

Le moteur synchrone se compose, comme le moteur asynchrone, d'un stator et d'un rotor séparés par l'entrefer. Il s'en différencie par le fait que le flux dans l'entrefer n'est pas dû à une composante du courant statorique : il est créé par des aimants ou par le courant inducteur fourni par une source à courant continu extérieure qui alimente un enroulement placé dans le rotor.

- Le stator

Le stator comprend une carcasse et un circuit magnétique généralement constitués de tôles d'acier au silicium et d'un bobinage triphasé analogue à celui d'un moteur asynchrone alimenté en courant alternatif triphasé pour produire un champ tournant.

- Le rotor

Le rotor porte des aimants ou des bobines d'excitation parcourues par un courant continu qui créent des pôles Nord et Sud intercalés. Le rotor, à la différence des machines asynchrones tourne sans glissement à la vitesse du champ tournant.

Il existe donc deux types distincts de moteurs synchrones : les moteurs à aimants et les moteurs à rotor bobiné.

Pour les premiers, le rotor du moteur est équipé d'aimants permanents (Fig. II.1), en général en terre rare pour obtenir un champ élevé dans un volume réduit. Le stator comporte les enroulements triphasés.

Ces moteurs peuvent accepter des courants de surcharge importants pour réaliser des accélérations très rapides. Ils sont toujours associés à un variateur de vitesse et ces ensembles moto-variateurs sont destinés à des marchés spécifiques comme ceux des robots ou des machines-outils pour lesquels un moindre volume des moteurs, les accélérations et la bande passante sont des impératifs

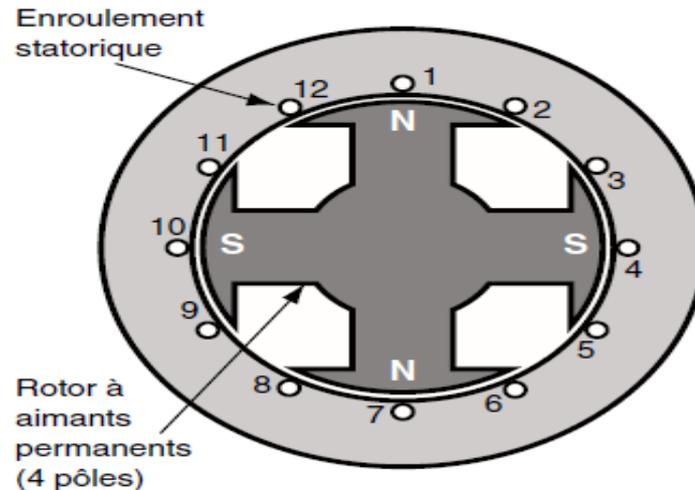


Fig. II.1: Coupe d'un moteur à aimants permanents.

Les autres machines synchrones sont à rotor bobiné, elles sont réversibles et peuvent fonctionner en générateurs (alternateurs) ou en moteurs. Pendant longtemps ces machines ont surtout été utilisées en alternateurs. Leur usage en moteur était pratiquement confiné aux applications où il était nécessaire d'entraîner des charges à vitesse fixe en dépit des variations relativement importantes de leur couple résistant.

Le développement des convertisseurs de fréquence directs (du type cyclo convertisseur) ou indirects fonctionnant en commutation naturelle grâce à l'aptitude des machines synchrones à fournir de la puissance réactive, a permis la réalisation d'entraînements électriques à vitesse variable performants, fiables et particulièrement compétitifs par rapport aux solutions concurrentes lorsque la puissance dépasse le mégawatt.

Bien que l'on puisse trouver des moteurs synchrones utilisés industriellement dans la gamme de puissance de 150 kW à 5 MW, c'est au-delà de 5 MW que les entraînements électriques utilisant des moteurs synchrones se sont pratiquement imposés, majoritairement associés à des variateurs de vitesse. [22].



Fig. II.2: moteur industriel à aimants permanents. Fig. II. 3: rotor de moteur synchrone à pôle Saillant 100 MW (à 600 tr/mn).

Le rotor porte autant de pôles que le stator. Comme pour le moteur asynchrone, le nombre de pôles détermine la vitesse du moteur, suivant l'équation:

$$n = \frac{60 f}{p} \quad \text{II.1}$$

Ou :

n = vitesse du moteur [tr/min]

f = fréquence du réseau [Hz]

p = nombre de pôles

II.3. Types des moteurs synchrones

Il existe différents types de moteurs synchrones monophasés et triphasés.

II.3.1. Moteurs synchrones à rotor excité

Les pôles magnétiques du rotor sont des électro-aimants alimentés en courant continu soit par l'intermédiaire de bagues collectrices à partir d'une alimentation cc. Externe fixe, soit de façon interne par un alternateur (du type sans balais) monté sur l'arbre du rotor (Fig.II.4).

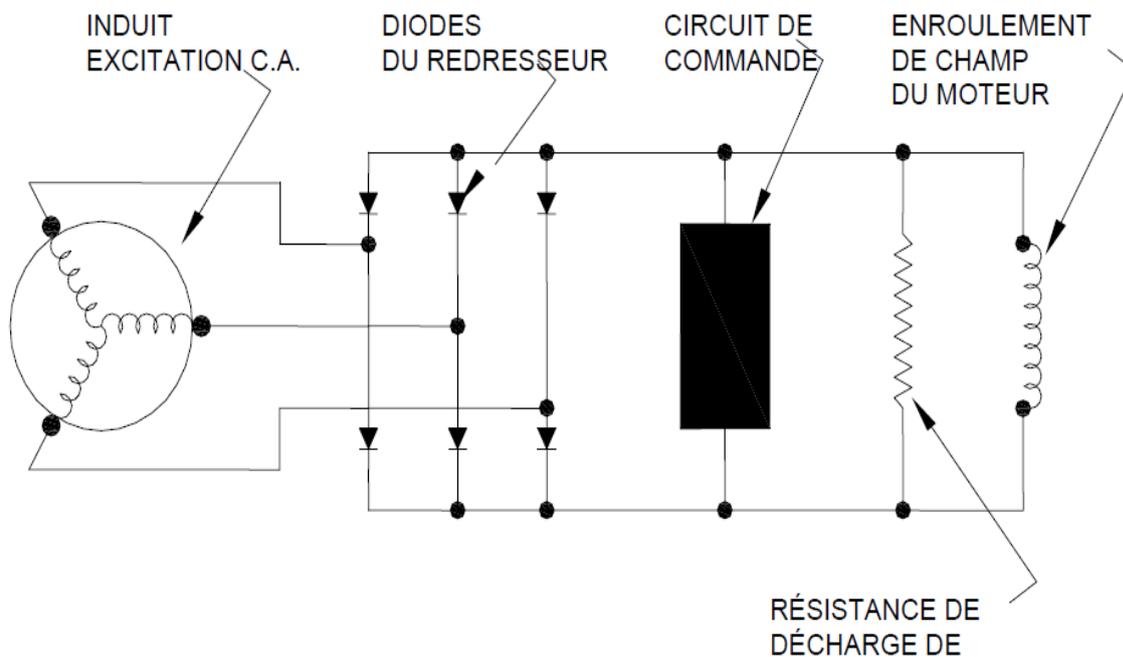


Fig. II.4: Excitatrice pour moteur synchrone sans balais

L'intensité du courant d'excitation peut être ajustée en faisant varier le courant rotorique du moteur à balais ou l'excitation du champ de l'alternateur du moteur sans balais.

La modification du niveau d'excitation du rotor entraîne une modification du facteur de puissance du moteur. Le moteur peut fonctionner avec un facteur de puissance inductif (sous-excité) ou capacitif (surexcité).

Un moteur synchrone surexcité est idéal pour corriger un mauvais facteur de puissance dans une usine et son niveau d'excitation peut être ajusté en fonction des besoins. Ce type d'utilisation est parfois appelé marche en « compensateur synchrone ».

II.3.2. Moteurs synchrones à rotor non excité ou à réluctance

Dans ce type de moteur, on utilise un rotor en fer dont la forme favorise des parcours fixes du flux magnétique (Fig. II.5). Leur gamme de puissance va des moteurs à puissance fractionnaire jusqu'à ceux de 30 HP environ.

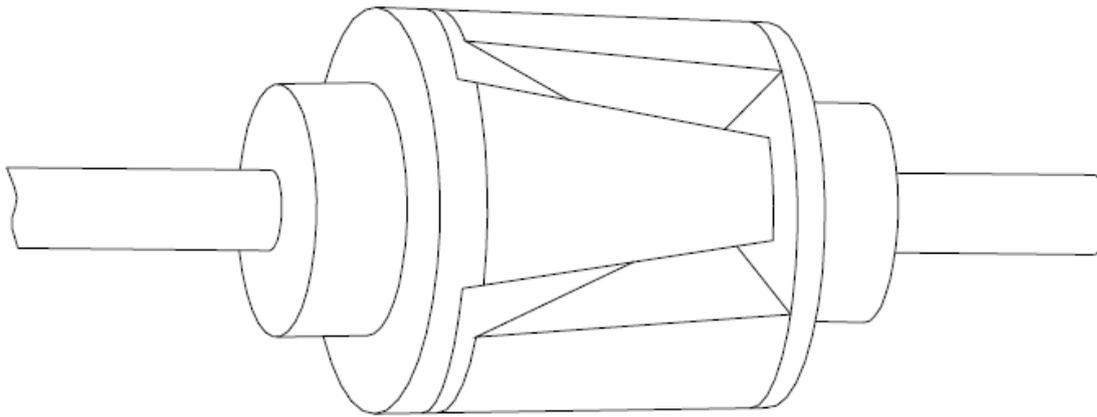


Fig. II.5: Moteur synchrone à rotor non excité.

On emploie parfois des aimants permanents sur les rotors des moteurs de petite puissance. Les moteurs à rotor à réluctance présentent un facteur de puissance peu élevé durant leur fonctionnement. Ils sont également plus encombrants physiquement que les moteurs avec excitation d'une puissance assignée similaire. [23]

II.4. Principe de fonctionnement

Le rotor, alimenté en courant continu, par un système de contacts glissants (bagues), crée un champ magnétique rotorique qui suit le champ tournant statorique avec un retard angulaire θ lié à la charge (plus la charge est importante, plus θ est grand). Étant donné que le rotor tourne à la même vitesse que le champ tournant, ce moteur ne peut pas être démarré directement sur le réseau 50 Hz. On peut utiliser un convertisseur de fréquence dont la fréquence augmente progressivement lors de la phase de démarrage (rampe). On peut aussi démarrer ce moteur en " asynchrone ", en utilisant l'enroulement inducteur comme secondaire. Ce moteur peut également être utilisé pour relever le facteur de puissance d'une installation. Dans ce cas, il doit être " surexcité ". Il fournit alors de la puissance réactive au réseau (charge capacitive).

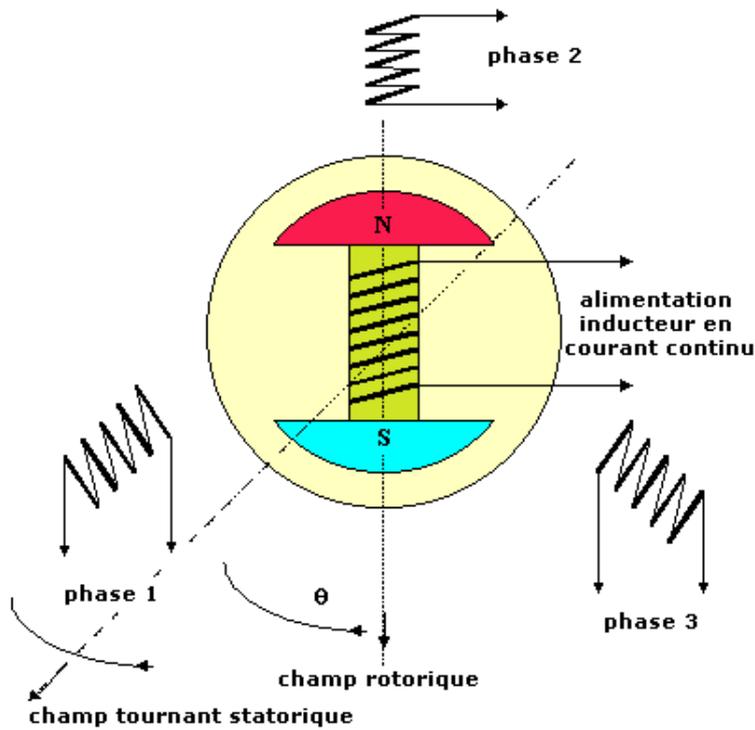


Fig. II.6: schéma de principe de fonctionnement de moteur synchrone. [24]

II.4.1. Modèle équivalent d'une phase

Le stator de la machine étant constitué seulement de bobinages, le modèle équivalent est le suivant :

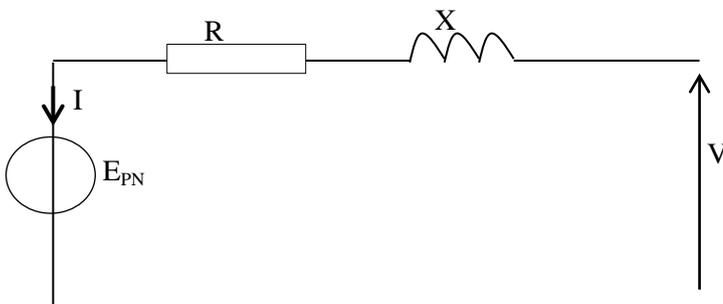


Fig. II.7: Modèle équivalent d'une phase

$$\vec{V} = \vec{U}_R + \vec{U}_x + \vec{E}_{PN} \tag{II.2}$$

$$U_R = R \cdot I \tag{II.3}$$

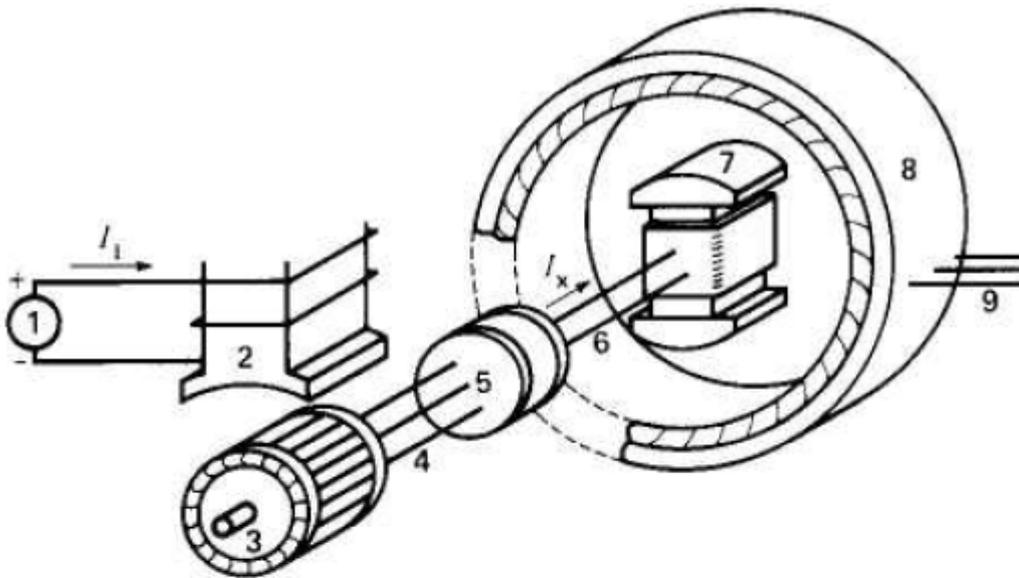
$$\varphi(\vec{I}, \vec{U}_R) = 0$$

$$U_x = X \cdot I = L \cdot \omega \cdot I \tag{II.4}$$

$$\varphi(\vec{I}, \vec{U}_x) = \pi/2$$

II.4.2. Démarrage du moteur synchrone

Le moteur synchrone ne peut démarrer seul. C'est pourquoi on place une cage d'écurueil sur son rotor afin qu'il puisse démarrer en moteur asynchrone. En appliquant la pleine tension triphasée sur le stator, on crée un champ tournant qui amène rapidement le moteur à une vitesse légèrement inférieure à sa vitesse synchrone. En général, la résistance de la cage d'écurueil est assez élevée afin d'assurer un fort couple de démarrage.



- 1 - source de commande à c.c.
- 2 - pôles à c.c. stationnaires
- 3 - alternateur (excitatrice)
- 4 - ligne triphasée
- 5 - redresseur à diodes
- 6 - ligne à c.c.
- 7 - rotor du moteur synchrone
- 8 - stator du moteur synchrone
- 9 - ligne d'alimentation triphasée

Fig. II.8: Schéma montrant le principe de fonctionnement d'une excitatrice sans balais pour moteur synchrone.

Pendant la période de démarrage, les bobines du rotor ne sont pas alimentées par l'excitatrice. Comme le champ tournant balaie les bobines, aussi bien que les barres de la cage, une tension élevée est induite dans ces bobines.

Afin de remédier à cet inconvénient et surtout pour améliorer le couple de démarrage, on court-circuite l'enroulement du rotor ou on le relie à une résistance extérieure pendant la période d'accélération. À mesure que le moteur accélère, la tension induite diminue et elle tombe à une valeur négligeable lorsque le rotor tourne presque à la vitesse synchrone.

Lorsque la puissance du réseau alimentant le moteur est limitée, on applique une tension réduite sur le stator comme on le fait dans le cas des gros moteurs asynchrone. Ainsi, on utilise des autotransformateurs, des résistances et parfois des réactances pour limiter le courant pendant le démarrage. Les moteurs synchrones de très grande puissance (20 MW et plus) sont parfois amenés à leur vitesse synchrone au moyen d'un moteur auxiliaire. Dans d'autres cas, on utilise un convertisseur électronique à fréquence variable pour accélérer la machine jusqu'à la vitesse synchrone.

II.5. Moteur en charge – description

Lorsque le moteur synchrone tourne à vide, les pôles du rotor sont vis-à-vis des pôles du champ tournant et l'axe du rotor coïncide avec l'axe central du stator (Fig.II:9). On se souvient que l'axe central du stator dépend de la phase des tensions appliquées au stator. Quand une charge mécanique est appliquée à l'arbre du moteur, les pôles du rotor glissent légèrement en arrière de ceux du champ tournant, tout en continuant à tourner à la même vitesse. L'angle de décalage α entre l'axe des pôles du rotor et l'axe central du stator croît à mesure que la charge augmente (Fig.II:10).

Cependant, la force d'attraction entre les pôles du rotor et les pôles contraires du stator les maintient accrochés, à moins que le couple appliqué ne devienne excessif. Plus la charge mécanique croît, plus l'axe des pôles du rotor s'éloignent de l'axe central du stator. Si la charge devient trop grande, les pôles du rotor décrochent des pôles du stator et le moteur s'arrête brusquement. Un moteur qui décroche produit une perturbation majeure sur le réseau et le disjoncteur de protection doit aussitôt s'ouvrir. Cela protège les enroulements du stator de même que la cage d'écureuil du rotor qui, autrement, s'échaufferaient rapidement lorsque le moteur perd son synchronisme.

Le couple de décrochage dépend de la force magnétomotrice des pôles du stator et du rotor. La FMM du rotor dépend du courant continu qui circule dans les bobines, tandis que celle du stator dépend du courant alternatif qui le parcourt. Donc, le couple de décrochage augmente si le rotor est surexcité, et il diminue s'il est sous-excité. En général, le couple de décrochage est compris entre 1,5 et 2,5 fois le couple nominal.

Le décalage α entre l'axe des pôles du rotor et l'axe central du stator produit un effet immédiat sur le courant triphasé tiré du réseau. Plus le décalage augmente, plus le courant croît ; c'est une conséquence normale, car un décalage accru correspond à une puissance mécanique plus grande. Or, la puissance mécanique provient nécessairement de la puissance électrique tirée du réseau.

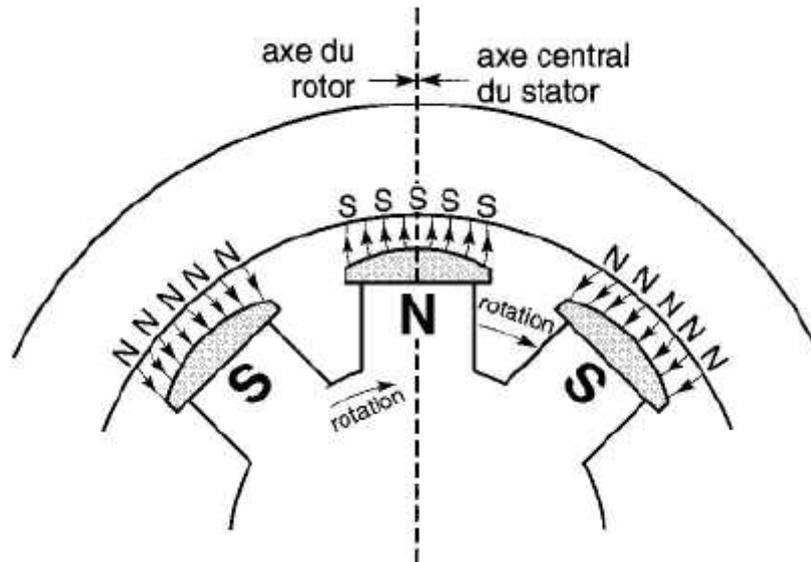


Fig. II.9: Les pôles du rotor sont attirés par les pôles contraires du stator. Lorsque le moteur fonctionne à vide, l'axe des pôles du rotor coïncident avec l'axe central du stator.

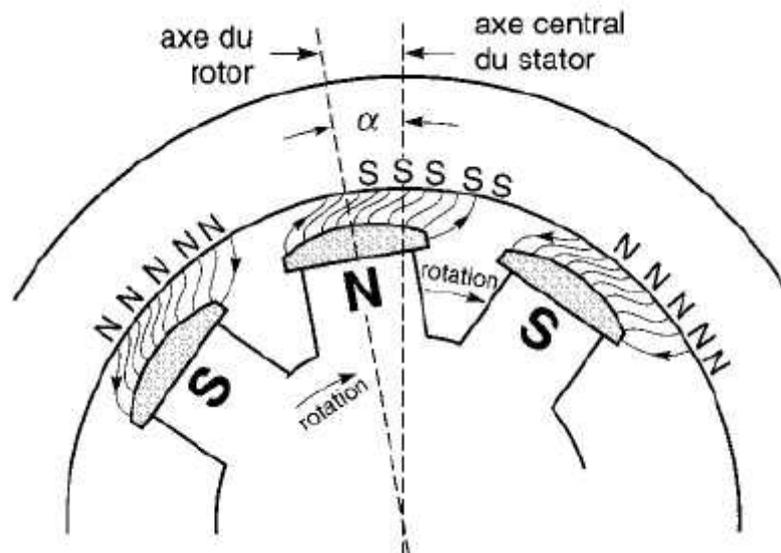


Fig. II.10 : Lorsque le moteur développe un couple, les pôles du rotor se déplacent en arrière des pôles du stator. L'angle α entre l'axe du rotor et l'axe central du stator est une mesure du couple exercé. [25]

II.5.1. la création du couple électromagnétique

Contrairement au moteur asynchrone, le couple électromagnétique n'est plus lié à un courant induit dans le rotor.

Le champ permanent créé par les aimants s'aligne sur le champ tournant du stator. Le couple est généré par le décalage angulaire entre la position du champ tournant et celle du rotor. Le rotor, à la différence des machines asynchrones, tourne donc sans glissement, à la vitesse du champ tournant créé par le stator et donc sans perte ni échauffement au rotor.

Il n'y a pas de risque de dilatation et l'entrefer peut être réduit, ce qui a une influence favorable sur le couple développé par la machine. [26]

II.5.2. Calcul du couple électromagnétique

On suppose que les courants statoriques formant un système triphasé équilibré sont de pulsation ω et que l'on a lancé le rotor à la vitesse ω_0 .

La valeur instantanée du couple électromagnétique s'écrit alors :

$$\Gamma_{em} = \|\vec{m} \wedge \vec{B}\| = m.B. \sin \theta(t) \quad \text{II.5}$$

$$\text{Avec } \theta(t) = (\omega - \omega_0) t + \theta_0$$

Deux cas de figure se produisent alors :

- Pour $\omega \neq \omega_0$ la valeur moyenne du couple est nulle :

$$\Gamma_{em} = 0 \quad \text{II.6}$$

Le couple moteur moyen étant nul, le rotor finit par s'arrêter sous l'effet des frottements.

- Pour $\omega = \omega_0$ on a $\theta(t) = \theta_0$ d'où :

$$\Gamma_{em} = m.B.\sin\theta_0 \quad \text{II.7}$$

Dans le cas où $\theta_0 \neq 0[\pi]$ le couple moteur moyen est non nul, le rotor se maintenant en rotation à la vitesse ω (vitesse de synchronisme).

θ_0 varie en fonction de la puissance délivrée (i.e. du couple résistant).

On déduit de ce qui précède qu'un moteur synchrone ne peut démarrer seul, le rotor doit être amené à la vitesse de synchronisme par un moteur auxiliaire. C'est là l'un des principaux défauts de ce type de moteur.

On notera que le stator doit être feuilleté pour limiter les pertes dues à l'apparition de courants de Foucault induits par le flux magnétique variable (le stator « voit » «en effet un flux variable).

Alors que le rotor, qui tourne à la vitesse de synchronisme (c'est également la vitesse de rotation de l'induction magnétique), voit un flux magnétique constant et n'est donc pas parcouru par des courants de Foucault, il n'a pas besoin d'être feuilleté. [27]

II.6. Bilan des puissances

En mode moteur, les pertes dans la machine synchrone se répartissent suivant la manière suivante :

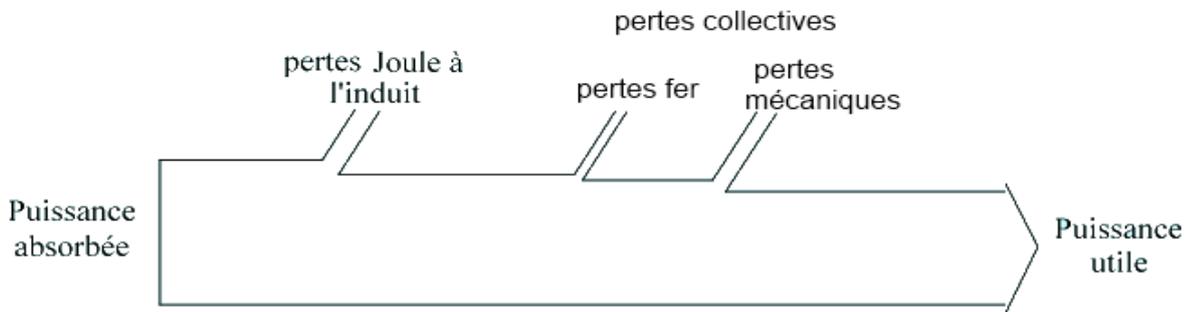


Fig. II.11: bilan de puissance de moteur

On regroupe habituellement les pertes fer dans le stator (pertes par hystérésis et courants de Foucault) et les pertes mécaniques car sous la tension nominale, elles ne dépendent toutes deux que de la vitesse de rotation du moteur (ce qui devient faux lorsque l'onduleur commande le moteur en amplitude variable).

Les rendements des machines synchrones à aimants permanents sont généralement très bons. (Meilleurs que pour les autres moteurs d'environ 1%) de l'ordre de 96% pour 100kW, 91% pour 6kW et 78% pour 1kW. [28]

L'expression littérale du rendement s'écrit :

$$\eta = \frac{Cu.\Omega}{\sqrt{3}.U.I.\cos\varphi} = \frac{Cu.\Omega}{Cu.\Omega.Pj+Pc} \quad \text{II.8}$$

II.7. L'avantage du moteur synchrone

L'avantage du moteur synchrone est sa vitesse de rotation constante,

Indépendante de la charge mécanique, dans certaines limites de fonctionnement. Ses inconvénients : son démarrage compliqué, qui doit être entraîné par un moteur auxiliaire afin de le ramener à la vitesse de rotation de synchronisation, et le risque de comportement instable au cas où le couple résistant dépasse la valeur critique.

Les moteurs synchrones de petite puissance trouvent des applications dans les domaines où une vitesse constante de rotation est nécessaire : horloges électriques, bandes de transports des chaînes de fabrication, moteurs pour les robots industriels. Les moteurs de grande puissance sont utilisés pour la traction mécanique, en particulier celui du TGV.

Enfin, la réversibilité le rend particulièrement utile pour un usage mixte dans les barrages hydrauliques : en mode normal, il fonctionne comme générateur électrique mais quand l'énergie électrique est en excès, il commute en mode moteur et pompe de l'eau en amont pour remplir le barrage, stockant ainsi l'énergie. [29]

II.8. Couplage sur un réseau de fréquence fixe

La machine a été couplée sur le réseau

Un wattmètre est placé au stator de la machine, son indication est :

- positive si l'énergie électrique est transférée du stator vers le réseau,
- négative si l'énergie électrique est transférée du réseau vers le stator.

Une charge mécanique est disposée sur l'arbre. Le moment du couple résistant est augmenté :

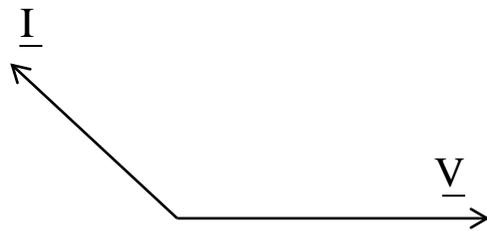
La puissance active disponible sur le stator augmente en valeur absolue, l'indication du wattmètre est négative. La machine fonctionne en moteur, elle convertit la puissance électrique en puissance mécanique.

L'intensité rotorique est modifiée à partir de ce point de fonctionnement :

- Si l'intensité d'excitation est augmentée, la puissance active est inchangée et la puissance réactive augmente.
- Si l'intensité d'excitation est diminuée, la puissance active est inchangée et la puissance réactive diminue.

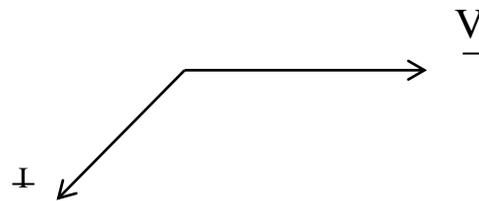
Pendant ces expériences, la vitesse de rotation est constante, elle est imposée par la fréquence du réseau (et dépend du nombre de pôles de la machine).

Diagramme pour une valeur « faible »
de l'intensité d'excitation



Dans cette situation, la puissance réactive est négative, la machine consomme de l'énergie réactive. Tout se passe comme si le stator était relié à une charge capacitive.

Diagramme pour une valeur « élevée »
de l'intensité d'excitation



Dans cette situation, la puissance réactive est positive, la machine fournit de l'énergie réactive. Tout se passe comme si le stator était relié à une charge inductive.

II.8.1. Couplage sur un réseau en moteur asynchrone

II.8.1.1. Principe

Le moteur synchrone ne présente aucun couple au démarrage. L'idée est de le démarrer en moteur asynchrone puis de le synchroniser.

II.8.1.2. Fonctionnement en moteur asynchrone

Le stator parcouru par des courants triphasés équilibrés engendre un champ tournant.

Pour qu'un couple non nul existe, il faut un champ tournant rotorique. Ce champ peut être dû à la circulation de courants :

- Soit dans l'enroulement d'excitation

L'enroulement rotorique doit être fermé pour qu'un courant puisse circuler.

La machine se comporte alors comme un moteur asynchrone avec stator triphasé et rotor bobiné monophasé.

- Soit dans les amortisseurs

La machine se comporte alors comme un moteur asynchrone avec stator triphasé et rotor à cage.

Les amortisseurs de Leblanc sont des conducteurs placés en périphérie du rotor et court-circuités à leurs deux extrémités, ils forment l'équivalent d'une cage de machine asynchrone. Leur rôle principal est de s'opposer aux oscillations issues d'un changement de point de

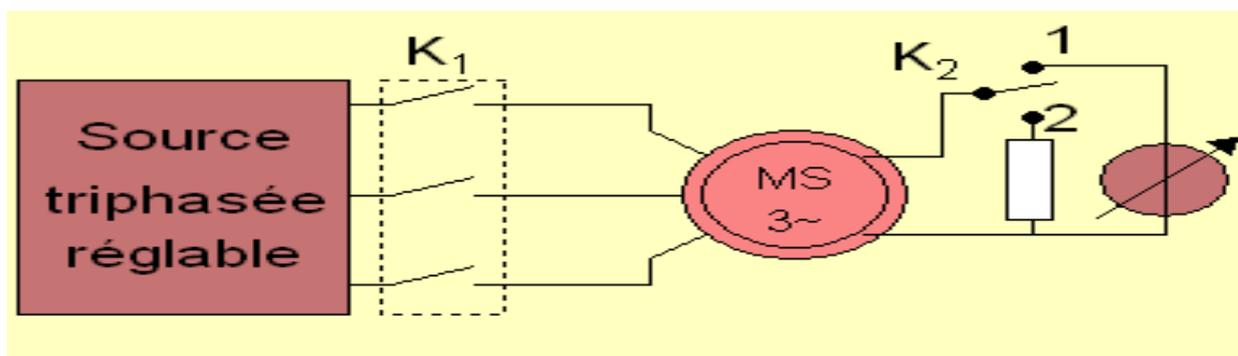
Fig. II.12: Procédure de couplage

Fonctionnement et d'atténuer l'influence des harmoniques : les amortisseurs tournent à la vitesse de synchronisme et sont soumis aux variations de flux dues aux oscillations et harmoniques. La variation du flux coupé engendre des f.e.m aux bornes des conducteurs et une circulation de courants qui s'opposent à la cause qui leur a donné naissance.

Le couple résultant de l'interaction entre les deux champs fait démarrer la machine.

II.8.2. Procédure de couplage

Le schéma de principe est représenté ci-dessous.



(Fig.II.11): Procédure de couplage

Réglage préliminaire : la source de tension continue est réglée pour délivrer une intensité égale à la valeur nominale de l'intensité d'excitation de la machine.

Le couplage se déroule en deux temps :

- Premier temps

L'enroulement rotorique est fermé sur une résistance du même ordre de grandeur que sa résistance.

Les enroulements statoriques sont connectés à l'alimentation triphasée et le moteur est démarré.

A la fin de cette phase, la vitesse doit être proche de la vitesse de synchronisme.

- **Deuxième temps**

La résistance rotorique additionnelle est supprimée et l'enroulement d'excitation est alimenté sous tension continue.

A l'issue de cette étape, la machine fonctionne en moteur synchrone à vide, sa vitesse de rotation est imposée par la fréquence du réseau.

Attention

Si la vitesse de rotation à l'instant de basculement du commutateur K2 est trop éloignée de la vitesse de synchronisme le rotor peut ne pas s'accrocher au champ tournant ce qui entraîne un blocage. [30]

II.9. Les compensateurs synchrones

Les compensateurs synchrones sont des moteurs synchrones tournant à vide, dont l'excitation est réglée pour fournir ou absorber la puissance réactive qui permet, par son transit en un point du réseau, d'ajuster la tension de ce point.

Avec les performances dynamiques qu'exige un haut niveau de sûreté du réseau, les compensateurs synchrones sont des moyens d'actions privilégiés.

Très employés en France dans les années 1950 et 1960, les compensateurs ont été délaissés ensuite au profit des condensateurs qui sont devenus plus compétitifs par suite des progrès techniques réalisés dans les films diélectriques très minces.

Les compensateurs synchrones ont toutefois conservé un rôle important dans les pays à lignes longues et peu maillées où, en plus d'un programme d'échange d'énergie réactive, ils assurent le maintien de la stabilité dynamique par leurs caractéristiques mieux adaptées à ce rôle que celles des condensateurs (inertie, réactance transitoire faible, régulation rapide d'excitation). Ils sont encore utilisés aux États-Unis, au Canada, en Russie et au Brésil où ils ont atteint, vers 1975, environ 10 % de la puissance apparente du réseau, mais, même dans ces pays, ils sont progressivement supplantés par les compensateurs statiques. [31]

II.10. Moteur Synchrone Autopiloté

Les moteurs synchrones auto-pilotés sont aussi appelés moteurs Brushless ou moteurs autosynchrones. Ils sont utilisés en commande d'axe de robots : on peut les commander en vitesse ou les commander en position avec un couple à l'arrêt.

II.10.1. Schéma de principe

La position réelle du rotor est relevée par un capteur de position (synchro-résolveur), elle permet de calculer les courants à appliquer aux enroulements pour choisir la position du champ statorique : on choisit l'angle interne, donc le couple, en fonction du type de commande souhaité.

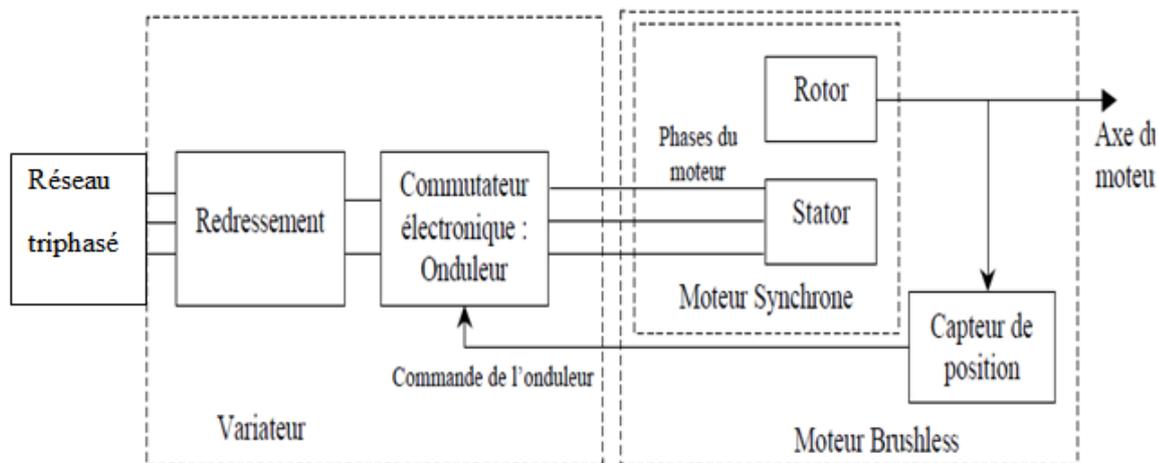


Fig. II.13: schéma de principe de moteur autopiloté

II.10.2. Avantages du moteur brushless

II.10.2.1. Caractéristiques générales

- Pas d'entretien (pas de collecteur) → Utilisable en atmosphère explosive, corrosive.
- Excellente dissipation thermique. (P_j au stator seulement).

II.10.2.2. Caractéristiques dynamiques et statiques

- Puissance massique \gg (P/m : kW/kg).
- Vitesse max \gg . (pas de collecteur).
- Faible inertie (forte accélération) d'où une bande passante mécanique \gg (rotor saucisson).

II.10.3. Inconvénients du moteur brushless

II.10.3.1. Caractéristiques générales

- Electronique interne.
- Prix en forte baisse car la production devient importante.
- Alimentation et de régulation complexe mais maîtrisée.

II.10.3.2. Caractéristiques dynamiques et statiques

- A basse vitesse les harmoniques peuvent créer des ondulations de couple. [32]

II.11. Domaine de fonctionnement

Dans le plan des puissances (AQ,AP), le diagramme vectoriel représentatif du fonctionnement avec $V=C^{te}$ s'établit comme suit :

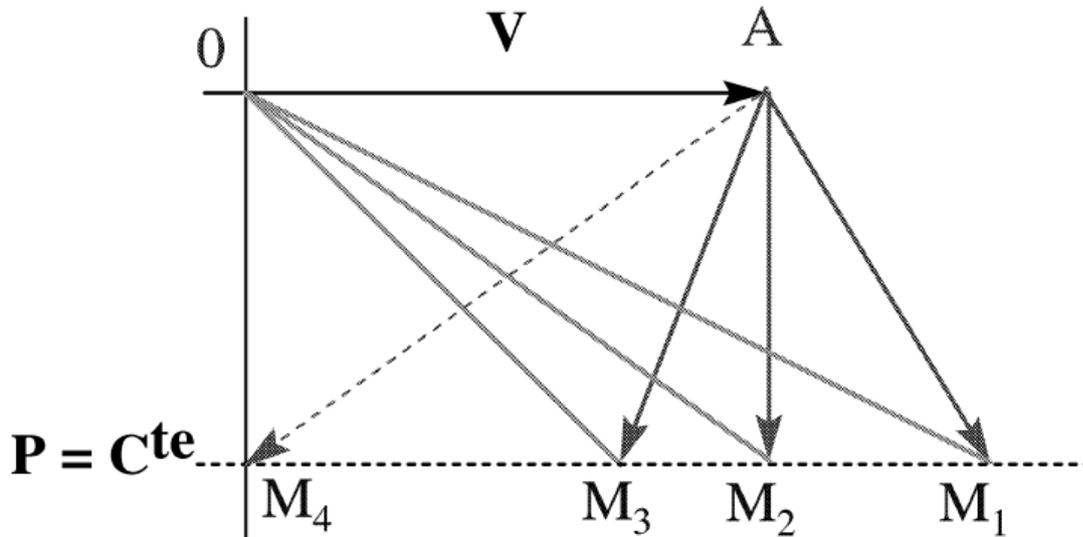


Fig. II.14: plan des puissances (AQ, AP)

Le domaine autorisé du fonctionnement en moteur peut lui aussi décrit par un diagramme dans un plan de coordonnées : I_f courant inducteur et I courant induit.

On trouve alors comme contraintes :

$$-I_f < I_{f \max} \text{ (droit vectoriel)}$$

$$-I < I_{\max} \text{ (droit horizontal)}$$

$$0 < P < P_{\max}$$

$$\text{-La limite de stabilité } (-\pi/2 < \delta < 0)$$

-des contraintes éventuelles sur le facteur de puissances

Les courbes à puissance active constante dans le plan (I_f, I) sont appelées en V ou courbes de Mordey.

La forme de ces courbes s'explique lorsque l'on considère l'action sur le courant inducteur dans le diagramme ci-dessus. La puissance active étant constante. La f.é.m. et donc le courant inducteur sont représentés par le vecteur OM_i ($i=1, 2, 3, \dots$). Le module de ce vecteur passe par un minimum pour $i=2$ qui correspond à une puissance réactive nulle. Le point M_4 correspond à la limite de stabilité, au-delà de laquelle le moteur décroche et s'arrête.

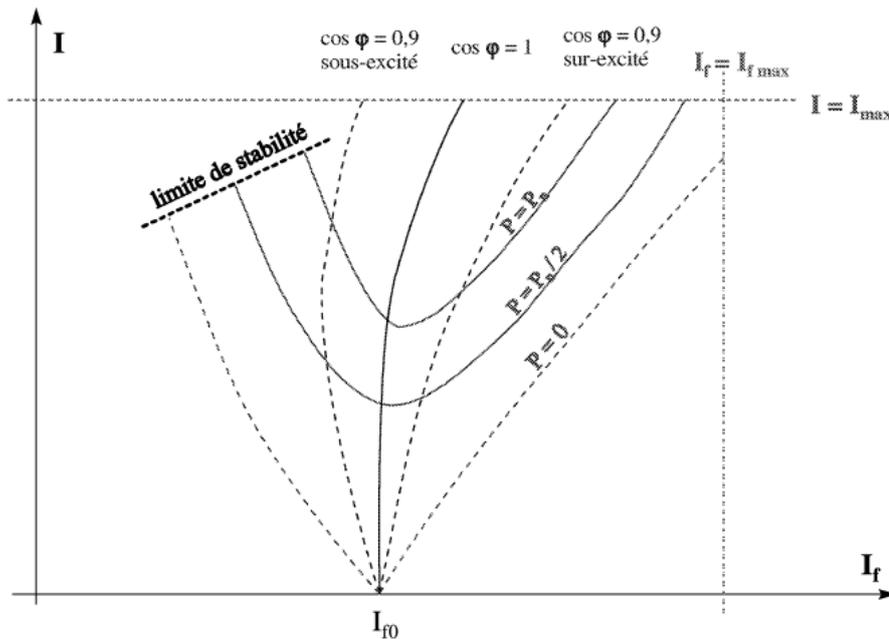


Fig. II.15: courbe de Mordey

L'absence de symétrie des courbes de Mordey est due :

- à la saturation magnétique.
- à la réaction d'induit. [33]

II.12. Stabilité

Pour un point de fonctionnement donné du moteur synchrone, si l'on augmente la valeur de l'angle θ au-delà de $\pi/2$, le synchronisme entre les deux champs tournants ne peut plus s'effectuer puisque le couple électromagnétique diminue : le moteur décroche.

Il s'agit de la limite de stabilité du fonctionnement du moteur synchrone. Pour rétablir le synchronisme, il faut augmenter la valeur du couple maximal en surexcitant la machine (augmentation de J et donc de E_V).

Pour améliorer cette stabilité, on place souvent des barres de cuivre dans les pôles de la machines : ce sont les amortisseurs de Leblanc.

Le couple du moteur synchrone ne peut exister qu'à la vitesse de synchronisme. Il faut donc utiliser un moteur auxiliaire pour le démarrer. La machine fonctionne alors en alternateur, puis, après couplage au réseau, en moteur synchrone.

Mais il est également possible d'effectuer sur certaines machines un démarrage du moteur à vide en asynchrone sur les amortisseurs de Leblanc ou sur des bobinages rotoriques triphasés auxiliaires (machine asynchrone synchronisée). [34]

II.13. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé les moteurs synchrones, premièrement nous avons faire une description générale sur les moteurs après nous avons étudions procédure de couplage ce moteur au réseau électrique. Et à la fin de chapitre nous avons présenté Les moteurs synchrones auto-pilotés.

Alternateur synchrone

III.1. Introduction

La machine synchrone est le plus souvent utilisée en générateur, on l'appelle alors alternateur. Les centrales de production de l'énergie électrique sont équipées d'alternateurs triphasés. Les machines synchrones sont réversibles. Elles fonctionnent aussi en moteur et occupent une place privilégiée dans les entraînements à vitesse variable. Dans ce chapitre nous avons exposé l'alternateur. [35]

III.2. Création de forces électromotrices triphasées

L'objectif est de produire de l'énergie électrique alternative à partir d'énergie mécanique.

La conversion électromécanique s'opère par interaction entre un champ magnétique inducteur et des conducteurs, aux bornes desquels apparaît une force électromotrice (f.é.m.) induite.

En effet, si l'on place une bobine de n_s spires dans un flux variables, elle est le siège d'une force électromotrice $e(t) = \pm \frac{d\phi(t)}{dt}$ III.1

Si le bobinage induit est triphasées, il est possible de générer un système triphasé de forces électromotrices ; si le flux est sinusoïdal, la force électromotrice l'est aussi.

La variation de flux à travers la bobine peut se réaliser de deux façons différentes :

- ✓ à partir d'un champ fixe et de conducteurs mobiles ;
- ✓ à partir d'un mobile et de conducteur fixe. [36]

III.3. Constitution – Principe – Excitation

III.3.1. Constitution: deux parties séparées par un entrefer.

- **Rotor ou roue polaire :** C'est la partie tournante. Parfois c'est un aimant permanent pour les petites machines, mais en général c'est un électroaimant sous forme d'un cylindre ferromagnétique massif recevant un bobinage qui, alimenté en courant continu (excitation), génère p paires de pôles sud et nord alternés.

Il existe des rotors à pôles saillants avec un nombre de paires de pôles p élevé, ou à pôles lisses

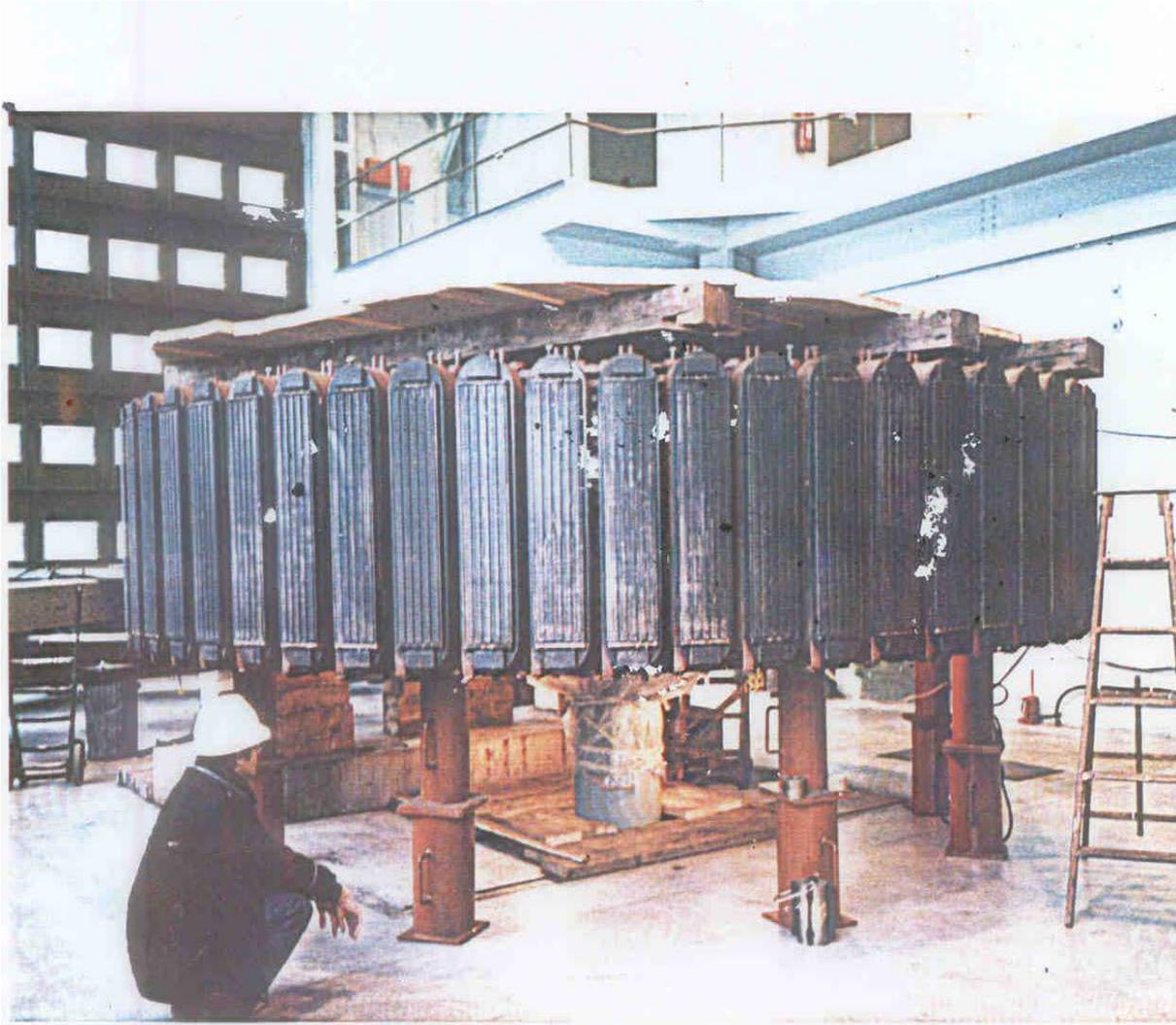


Fig. III.1: rotor d'alternateur de centrale hydrolique

- **Stator** : C'est la partie fixe, sous forme d'une carcasse ferromagnétique feuilletée comportant un bobinage triphasé qui, parcouru par des courants triphasés équilibrés génère un champ tournant à répartition quasi-sinusoidale de même nombre de pôles qu'au rotor. Les enroulements peuvent être couplés en étoile (cas le plus fréquent) ou en triangle.

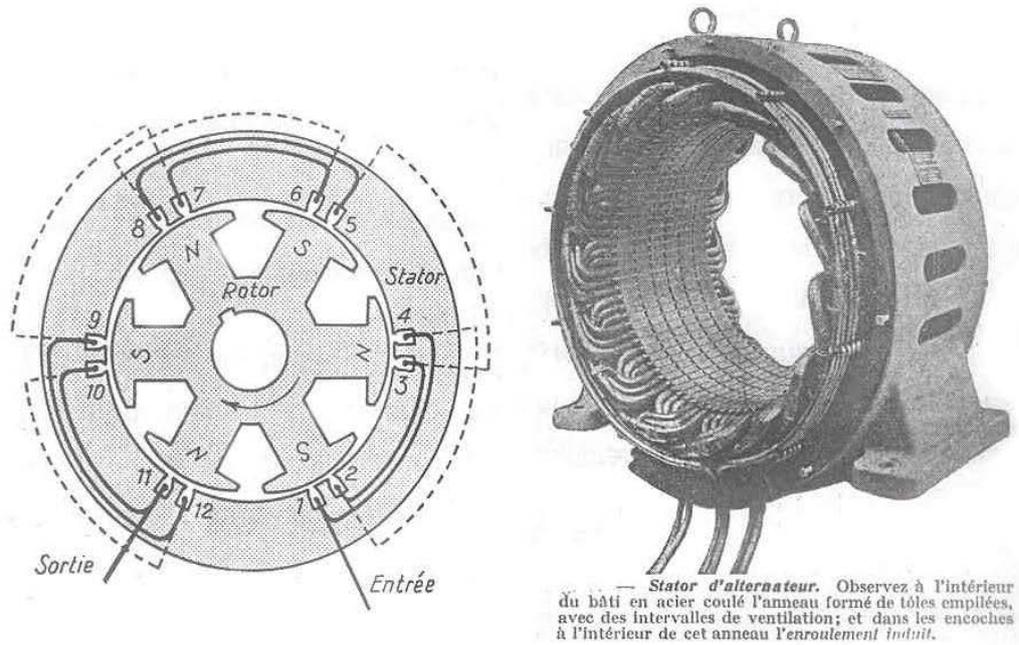


Fig. III.2: stator d'alternateur

Remarque :

- Généralement, l'inducteur est au rotor et l'induit au stator.

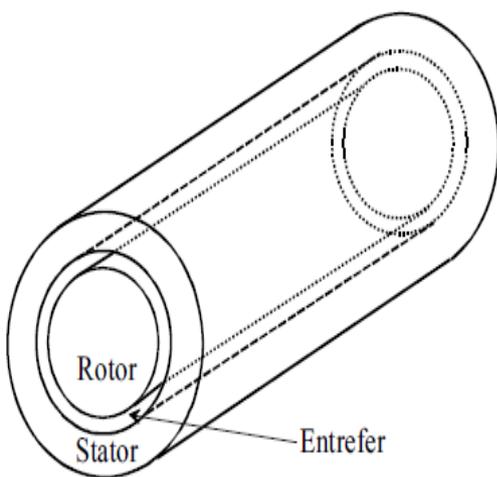


Fig. III.3: Machine à pole lisse

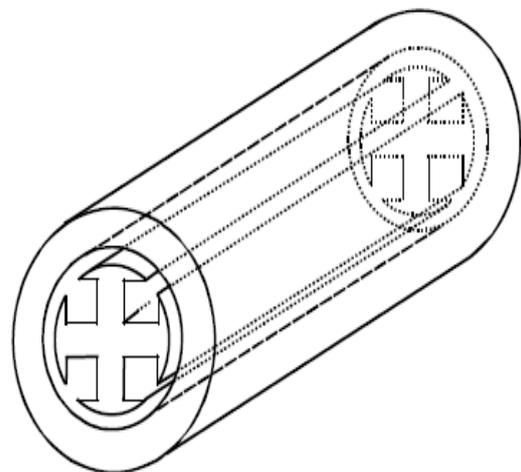


Fig. III.4: Machine à pole saillant

- Synchronisme

Le champ tournant du stator accroche le champ inducteur solidaire du rotor. Le rotor ne peut donc tourner qu'à la vitesse de synchronisme Ω_s .

III.3.2. Principe

Si on entraîne le rotor à la vitesse constante V , les enroulements statoriques, soumis au champ tournant rotorique, créent par induction un système triphasé de pulsation $v = pV$ ou $f = pn$ (v et V en rad/s, f la fréquence en Hz et n la vitesse en tr/s), p étant le nombre de paires de pôles du rotor.

C'est le fonctionnement en alternateur, utilisé dans la production d'énergie électrique.

III.3.3. Excitation de la machine

- Ce peut être une source extérieure qui alimente le rotor en courant continu via un système de bagues et de balais.
- Ce peut être la machine elle-même qui fournit sa propre excitation via une génératrice excitatrice ou un alternateur auxiliaire relié sur l'arbre. La machine est alors auto-excitée.

- Symboles et conventions

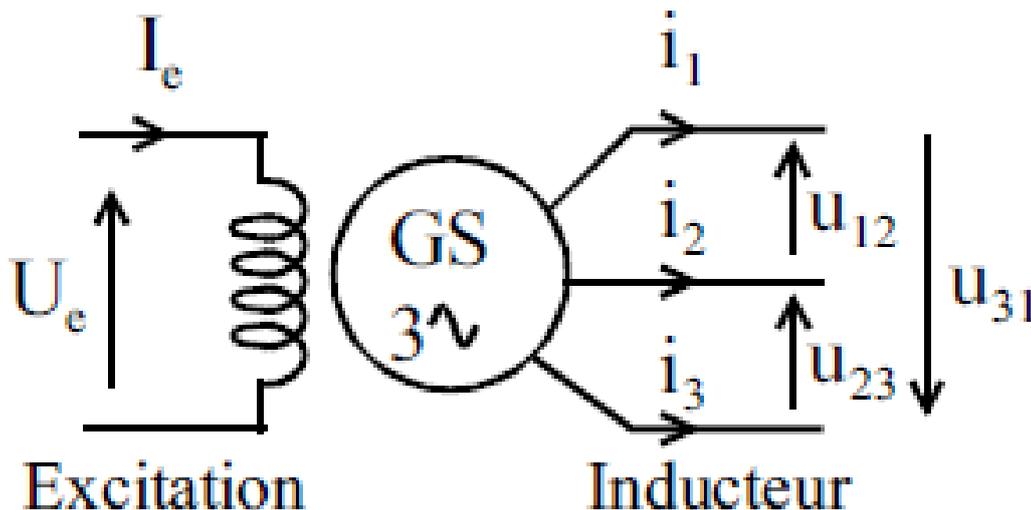


Fig. III.5: Alternateur.

- Plaque signalétique

La tension la plus faible est la tension nominale d'un enroulement du stator.

- Le courant le plus faible est le courant nominal en ligne dans le cas d'un couplage en étoile. Une plaque à bornes permet de réaliser le couplage.
- Sont aussi indiqués, pour le fonctionnement nominal, la puissance apparente, la fréquence d'utilisation, les grandeurs nominales (tension et courant) de l'excitation et parfois un facteur de puissance.

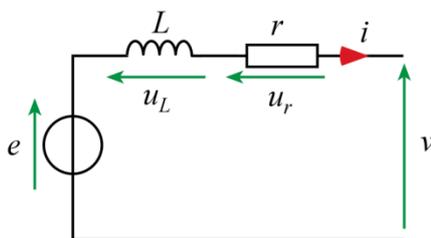
Δ/Y	230/400V	5,25/3A
2kVA	$\cos\phi$ 0,8	50Hz
Ex:50V	2,4A	

Fig. III.6 : Plaque signalétique.

Remarque : Un alternateur, comme un transformateur, n'a pas de facteur de puissance intrinsèque. Idéalement, il devrait être égal à l'unité. En pratique, on tolère un fonctionnement avec un facteur de puissance parfois indiqué sur la plaque. [37]

III.4. Modèle équivalent de l'enroulement du stator

III.4.1. Modèle de l'induit



e : f.é.m. à vide (V)

v : tension aux bornes d'un enroulement de la machine (V)

r : résistance de l'enroulement (Ω)

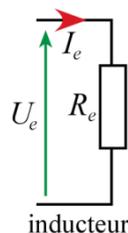
$X = L.\omega$: réactance synchrone (Ω)

Fig.III.7 : modèle de l'induit

Le courant est orienté en « convention générateur ».

III.4.2. Modèle de l'inducteur

L'inducteur est équivalent à une résistance



Toute l'énergie absorbée à l'inducteur est perdue par effet joule :

$$P_e = U_e I_e = R_e I_e^2 = p_{je} \tag{III.2}$$

Fig. III.8 : modèle de l'inducteur

- Loi des mailles

Loi des mailles avec les grandeurs instantanées : $e = v + u_L + u_r$ III.3

Loi des mailles avec les grandeurs vectorielles : $\vec{E} = \vec{V} + \vec{U}_L + \vec{U}_r$ III.4

avec : $\vec{V}(V, \phi); \vec{U}_L(L\omega I + \frac{\pi}{2})$

- Diagrammes de Fresnel

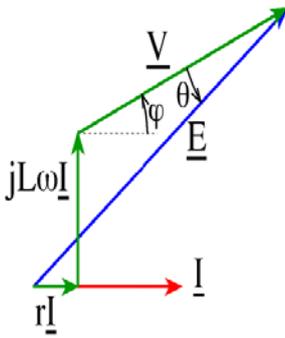


Fig.III.9 : diagramme de Fresnel

Remarque :

- très souvent $r.I$ est négligé.
- en traçant le diagramme à l'échelle, il est possible d'en déduire certaines grandeurs.
- si la charge est résistive $\varphi = 0$.

III.4.3. Réaction magnétique d'induit

En charge, le courant dans l'induit (stator) crée un deuxième champ magnétique tournant qui modifie les caractéristiques de la machine. C'est ce que l'on nomme la réaction magnétique d'induit.

L'inductance L du schéma tient compte de l'inductance réelle de l'enroulement et de la réaction magnétique d'induit.

III.5. Bilan des puissances d'un alternateur

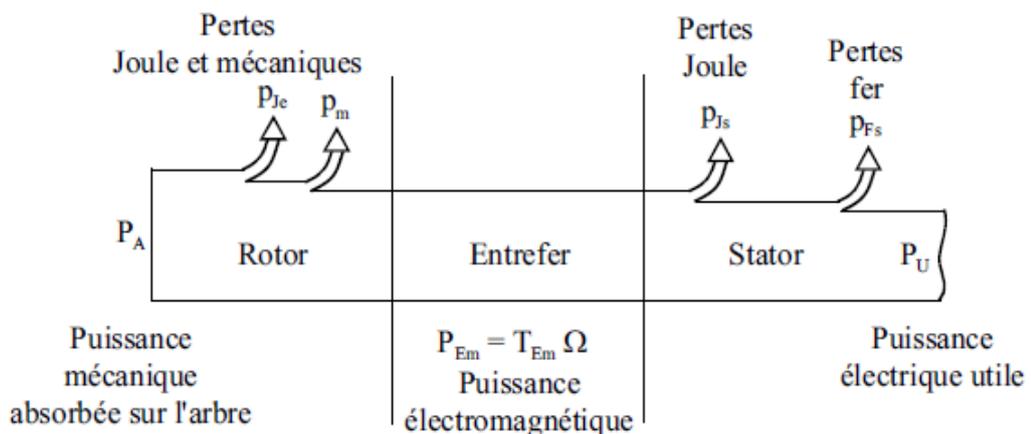


Fig. III.10:Arbe de puissance

- **Puissance mécanique**

La turbine, ou le moteur à essence pour un groupe électrogène, entraîne l'arbre de l'alternateur avec un couple T_m . La puissance absorbée est mécanique.

$$P_m = \Omega_s \cdot T_M = 2 \pi n_s T_M \quad \text{III.5}$$

Ω_s : pulsation de rotation en rad.s^{-1}

n_s : vitesse en tr.s^{-1}

T_M : couple utile sur l'arbre en N.m

- **Puissance absorbée par le rotor**

$$P_e = U_e \cdot I_e \quad \text{III.6}$$

Si l'alternateur est à excitation indépendante, il faut encore tenir compte de l'énergie électrique absorbé par l'excitation (rotor).

Si l'alternateur est auto-excité, la puissance reçue par l'inducteur (excitation) est fournie par le système d'entraînement et se trouve donc incluse dans le terme :

$$P_{mca} = \Omega_s \cdot T_M \quad \text{III.7}$$

- **Puissance absorbée totale**

Alternateur à excitation indépendante : $P_a = \Omega_s \cdot T_M + U_e \cdot I_e \quad \text{III.8}$

Alternateur auto-excité : $P_a = \Omega_s \cdot T_M \quad \text{III.9}$

Alternateur à excitation à aimants permanents : $P_a = \Omega_s \cdot T_M \quad \text{III.10}$

- **Puissance utile**

$$P_u = V \cdot I \cdot \cos \varphi \quad \text{III.11}$$

La charge reliée à l'alternateur absorbe un courant de valeur efficace I et présente un facteur de puissance $\cos \varphi$.

- **Pertes par effet joule dans l'inducteur**

$$p_{je} = U_e \cdot I_e = R_e I_e^2 \quad \text{III.12}$$

- **Pertes par effet joule dans l'induit**

$$p_{ji} = rI^2 \quad \text{III.13}$$

- **Pertes par effet joule dans l'induit**

$$p_j = rI^2 + R_e I_e^2 \quad \text{III.14}$$

- **Pertes dites « collectives » p_c**

Pertes mécaniques et pertes fer qui ne dépendent pas de la charge.

Remarque

Comme les pertes mécaniques et les pertes fer dépendent de la fréquence et de la tension U , elles sont généralement constantes (50 Hz - 220V).

- **Rendement**

$$\eta = \frac{p_u}{p_a} \quad \text{III.15}$$

III.6. Fonctionnement en génératrice

La génératrice synchrone est plus connue sous le nom d'alternateur.

Un système mécanique entraîne le rotor. Il y a création d'un système de tensions triphasées dans les enroulements du stator.

III.6.1. Relation entre vitesse de rotation et fréquence des tensions et courants avec : $f = pn$

f : fréquence (en Hz)

n : vitesse de rotation (en tr/s)

p : nombre de paires de pôles

Pour avoir $f = 50$ Hz

Tableau. III.1: relation entre la vitesse de rotation et fréquence

P	N (tr/s)	N (tr/min)	Ω (rad/s)
1	50	3000	314
2	25	1500	157
3	16.7	1000	105
4	12.5	750	79
25	2	120	12.6
50	1	60	6.3

Remarques

La production de l'énergie électrique se fait avec des alternateurs de grandes puissances (jusqu'à 1450 MW) :

- turboalternateurs de centrales thermiques (à pôles lisses : $p = 2$ ou 1)
- hydro alternateurs de barrages hydrauliques (à pôles saillants : $p \gg 1$)

Ex. pour avoir $f = 50$ Hz :

- turboalternateur ($p = 2$) à 1500 tr/min –hydro alternateur ($p = 40$) à 75 tr/min. [38]

III.6.2. Etude de l'alternateur

- Fonctionnement à vide

Pour simplifier le raisonnement supposons que le stator de l'alternateur monophasé ne comporte qu'un seul bobinage. Faisons maintenant passer un courant continu dans le rotor et faisons-le tourner à une vitesse N .

Nous savons que le champ produit par un aimant qui se déplace devant un fil conducteur engendre dans ce fil, une force électromotrice:

- a) dont la valeur est proportionnelle au champ et à la vitesse de rotation de l'aimant
- b) dont le sens est donné par la règle du tire-bouchon.

En pratique, le bobinage a plusieurs spires, afin d'augmenter la force électromotrice engendrée. La force électromotrice totale produite est alors égale à la somme des forces électromotrices développées dans chacune des spires de la bobine.

- Expression de la f.e.m.

Formule générale : $E = 2,22 k_f k_b f N \Phi$
 III.16

$$E = 2,22 k_f k_b f N \Phi \quad \text{III.17}$$

k_f : coefficient de forme (le champ n'est pas sinusoïdal k_f peut être >1)

k_b : coefficient de bobinage ($K_b < 1$)

f : fréquence en hertz (Hz)

P : nombre de paires de pôles du rotor

n : vitesse en tours seconde

N : nombre de conducteurs

ϕ : flux sous un pôle (weber)

$K = 2,22 k_f k_b$: coefficient de Kapp de la machine synchrone (1,6 à 2,9)

$$E = K N f \phi = K N p n \phi \quad \text{III.18}$$

- **Caractéristique à vide L'alternateur fonctionnant à vide (sans charge), on fait varier le courant d'excitation et on relève la f.e.m. correspondante**

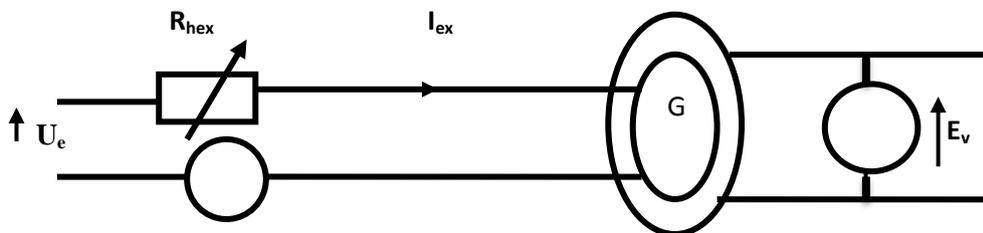


Fig.III.11 : L'alternateur fonctionnant à vide

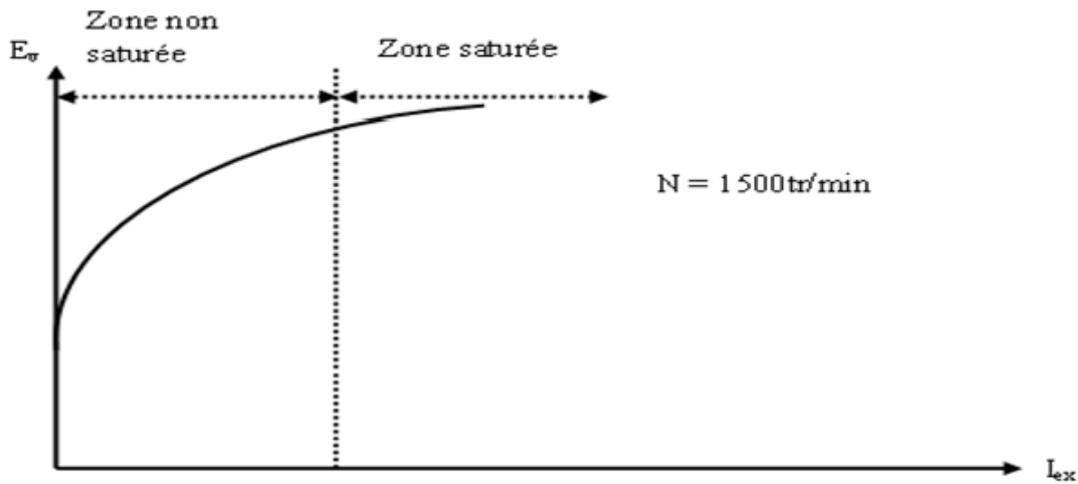


Fig. III.12: courbe la variation du f.e.m courant d'excitation I_{ex}

E_r : F.e.m. rémanente ; elle sert à l'amorçage de l'alternateur (voir excitation).

La caractéristique est considérée comme une droite dans la partie non saturée, autrement dit la f.e.m. y est proportionnelle au courant d'excitation :

$$E_v = E_r + kI_{ex} \quad \text{III.19}$$

L'alternateur fonctionne normalement dans la zone saturée.

- Fonctionnement en charge

• Chute de tension

1) Causes des chutes de tension La résistance de l'induit qui produit une chute de tension RI : La réaction magnétique de l'induit qui modifie le flux utile et par conséquent la f.e.m. Elle dépend du courant débité I et de son déphasage φ ; Les fuites magnétiques qui engendrent une chute de tension inductive supplémentaire proportionnelle à I .

2) Détermination de la chute de tension Elle se fait à N et I_{ex} constants La mesure directe : Elle n'est valable qu'avec de petits alternateurs.

$$\Delta U = E_v - U \quad \text{III.20}$$

E_v = f.e.m. à vide

U = tension en charge

III.6.3. La mesure indirecte

Elle est valable quelle que soit la puissance de l'alternateur.

A partir d'essais à faible puissance, on détermine la chute de tension à n'importe quelle charge à l'aide d'un diagramme. Il existe trois principales méthodes :

- Méthode de Behn-Eschenburg
- Méthode de Potier
- Méthode de Blondel

Ces méthodes diffèrent les unes des autres par la façon dont elles tiennent compte de la réaction d'induit et des fuites magnétiques

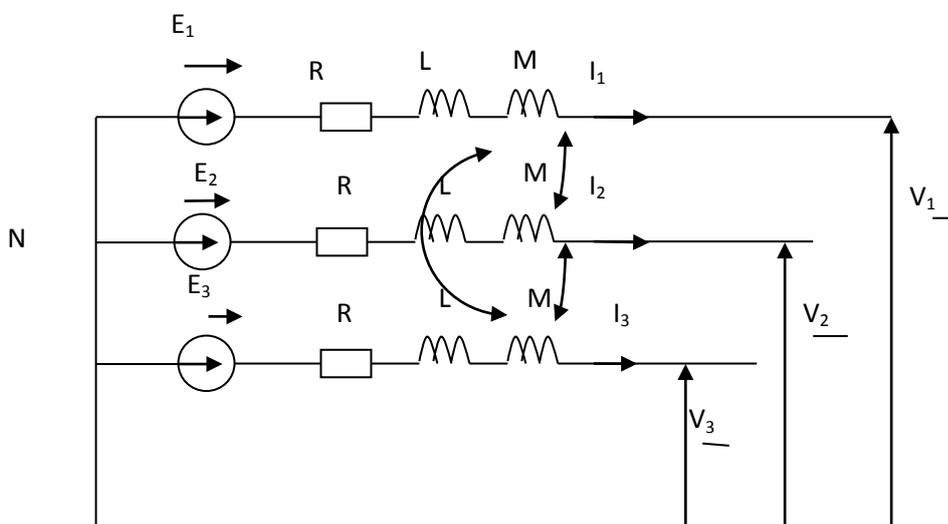
III.6.3.1. Diagramme de Behn – Eschenburg

- **Hypothèse fondamentale**

Le circuit magnétique n'est pas saturé autrement dit la f.e.m. est proportionnelle au courant d'excitation. Elle donne une chute de tension trop grande mais plus facile à déterminer.

On représente le circuit triphasé correspondant aux caractéristiques de la machine sur la figure. L'écriture des équations de maille de chaque phase met en évidence un schéma monophasé équivalent simple basé sur une inductance équivalente dite inductance synchrone. Ce modèle s'appelle le modèle linéaire de Behn-Eschenburg.

Ce modèle est basé sur la linéarité du circuit magnétique qui constitue la machine, linéarité qui se traduit par la régularité d'utilisation de l'inductance (propre et mutuelle). Pourtant, quand on relève la valeur efficace de la force électromotrice E .



$$E_1 = R \cdot I_1 + jL\omega \cdot I_1 + jM\omega \cdot I_2 + jM\omega \cdot I_3 + V_1$$

III.21

$$E_2 = R \cdot I_2 + jL\omega \cdot I_2 + jM\omega \cdot I_1 + jM\omega \cdot I_3 + V_2$$

III.22

$$E_3 = R \cdot I_3 + jL\omega \cdot I_3 + jM\omega \cdot I_2 + jM\omega \cdot I_1 + V_3$$

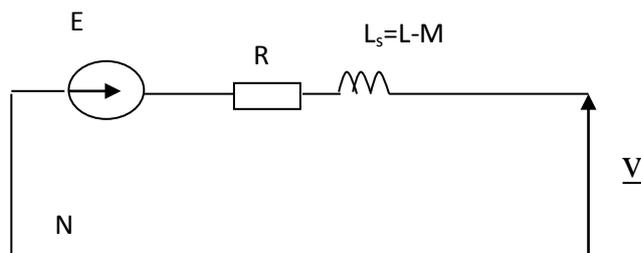
III.23

Si la machine est équilibrée sans neutre

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = \underline{0} \quad \text{III.24}$$

C'est-à-dire :

$$\underline{E}_1 = R \cdot \underline{I}_1 + jL\omega \cdot \underline{I}_1 + jM\omega \cdot (\underline{I}_2 + \underline{I}_3) + \underline{V}_1 \quad \text{III.25}$$



$$\text{Soit : } \underline{E}_1 = [R + j(L - M)\omega] \cdot \underline{I}_1 + \underline{V}_1 \quad \text{III.26}$$

$$\underline{E} = (R + jL_s\omega) \cdot \underline{I} + \underline{V} \quad \text{III.27}$$

Relation de maille du schéma monophasé équivalent:

L_s : inductance dite "synchrone"

On parle aussi de la "réactance synchrone":

$$X_s = L_s \cdot \omega$$

III.28

En fonction du courant d'excitation I_e , on constate que celle-ci présente une saturation. On représente sur la figure l'aspect typique de la tension $E(I_e)$ ainsi que le schéma équivalent résiduel en mode saturé.

En effet, si le fonctionnement de la machine fait intervenir une saturation magnétique, l'inductance synchrone n'est plus valable et le modèle devient faux. On fait alors intervenir uniquement dans le

modèle l'inductance de fuites de la machine (qui n'est pas saturable) et la tension à vide réelles (mesurée au préalable).

L'étude des fonctionnements en régime saturé fait intervenir des méthodes particulières non développées ici.

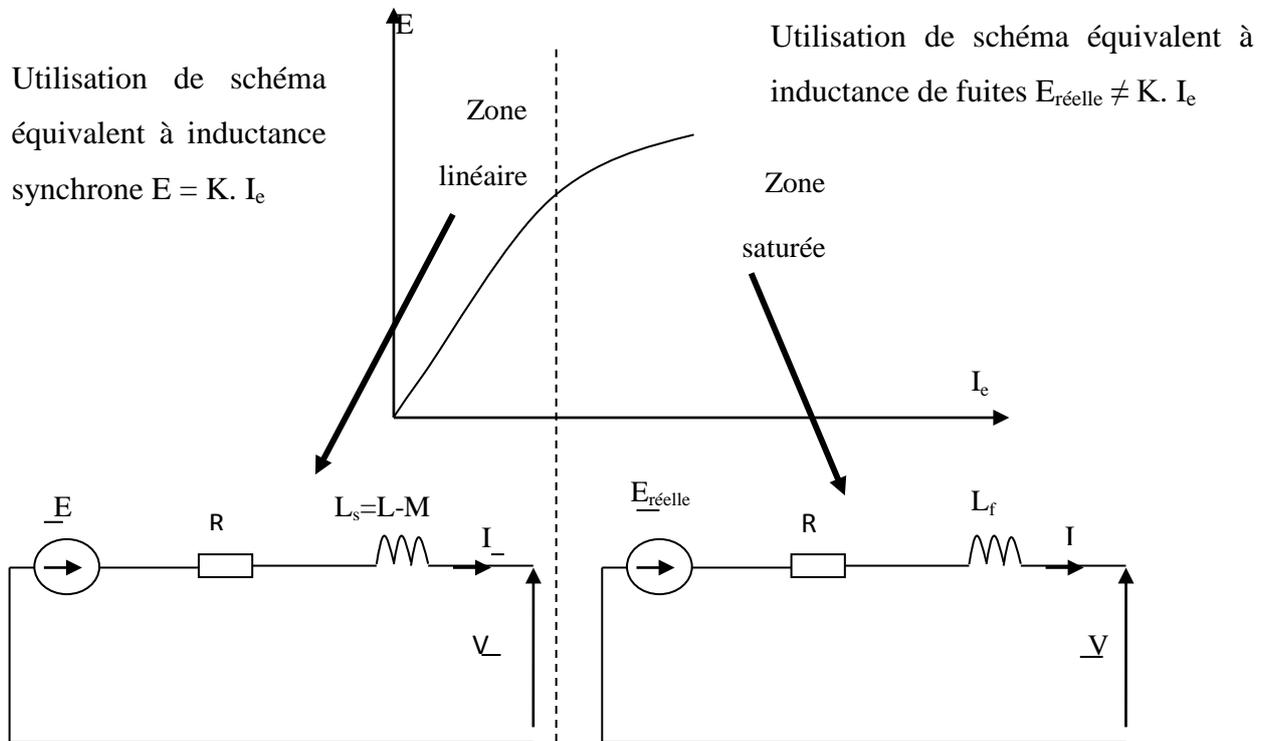


Fig. III.13: zone linéaire et zone de saturation de la machine

- **Détermination de la réactance synchrone LW**

Essai à vide : on relève la caractéristique à vide $\underline{E}_v(I_{ex})$ Essai en court-circuit : on relève $\underline{I}_{cc}(I_{ex})$ pour la vitesse sensiblement égale à la vitesse nominale. La caractéristique en court-circuit est sensiblement droite passant par l'origine; elle est indépendante de la vitesse Pour déterminer LW il suffit de tracer sur le même graphe les deux caractéristiques $\underline{E}_v(I_{ex})$ et $\underline{I}_{cc}(I_{ex})$.

- **Détermination de la réactance synchrone de Behn- ESCHENBURG**

On réalise un essai à vide et un essai en court – circuit (I_{cc} faible)

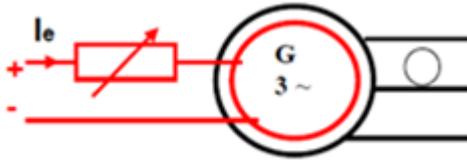


Fig.III.14 : Essai à vide

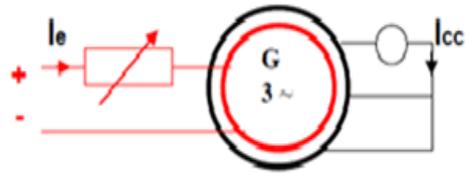
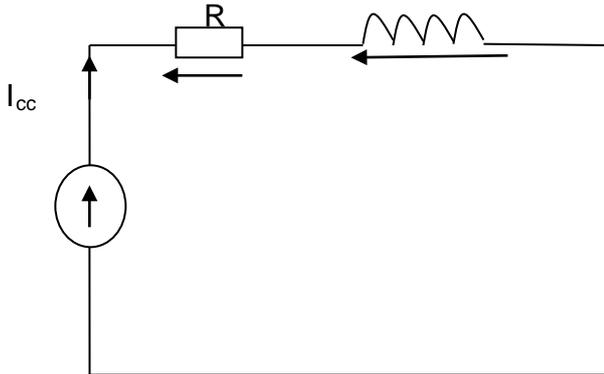


Fig.III.15 : Essai à court-circuit

Le schéma équivalent en court - circuit devient :



R = résistance d'une phase

$X = L\omega$ = réactance synchrone

$$Z = R + jL\omega \tag{III.29}$$

Pour le même courant d'excitation on relève E_1 et I_{cc1} ; l'impédance est donc :

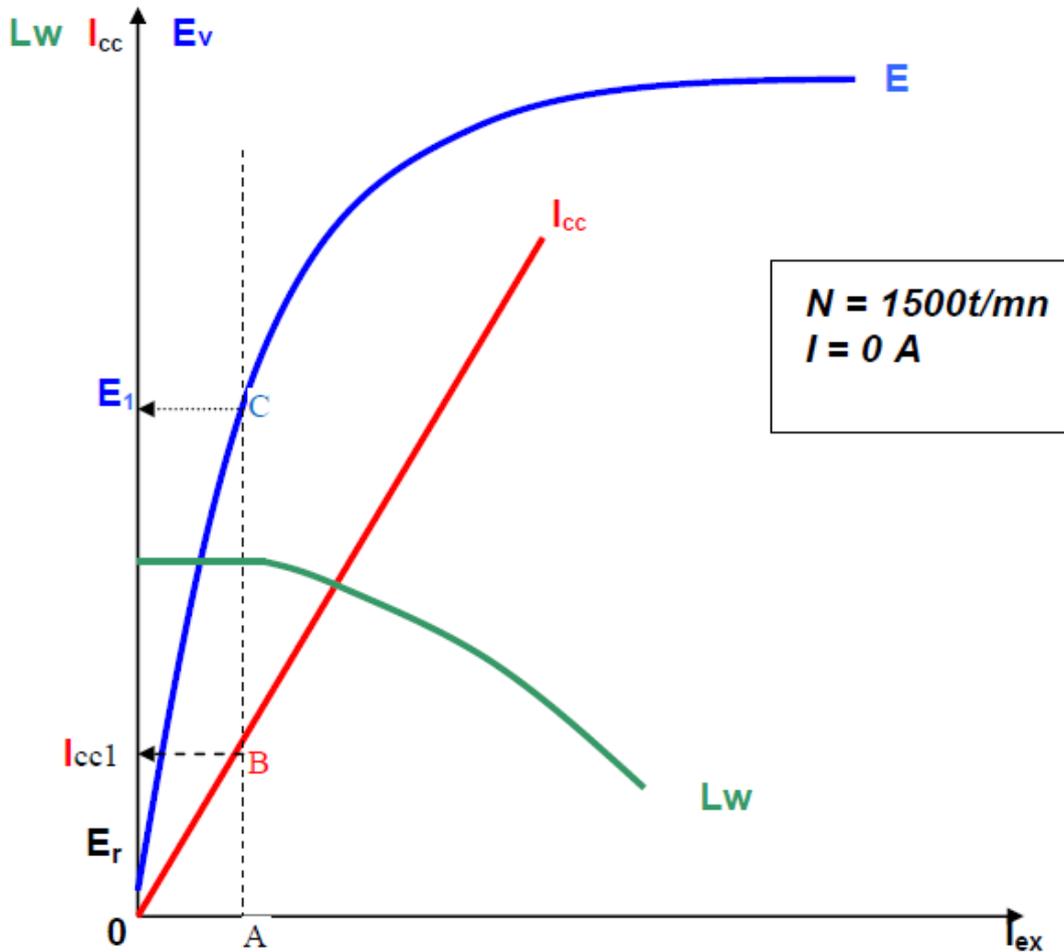
$$Z = \sqrt{R^2 + (L\omega I)^2} = \frac{AC}{AB} = E_1 / I_{cc1} \tag{III.30}$$

Si R négligée alors $Z = L\omega$ Valeur relative de $X=L\omega$ Impédance de base par phase:

$$Z_n = \frac{V^2}{S_n} \tag{III.31}$$

La réactance synchrone peut s'exprimer en % de l'impédance de base ou en valeur relative (p,u)

$$X(p, u) = \frac{X}{Z_n} \tag{III.32}$$



Remarque : L_w est constant dans la zone non saturée et décroît dans la zone saturée. [39]

III.6.3.2. Le diagramme de potier

Le diagramme vectoriel de réaction de potier est une amélioration du modèle de Behn-Eschenburg. Cette méthode permet de prendre en compte la saturation du matériau magnétique. Dans cette approche, les flux de fuites de l'induit sont supposés être indépendants de la saturation magnétique. De ce fait, une inductance L_f est définie pour ces flux de fuites. Le lecteur pourra se reporter à l'annexe B pour trouver l'expression analytique de cette inductance de fuite ainsi que celle de la résistance d'une phase R_s . Les figures et décrivent respectivement le diagramme vectoriel de potier et le schéma électrique équivalent par phase qui lui est associé.

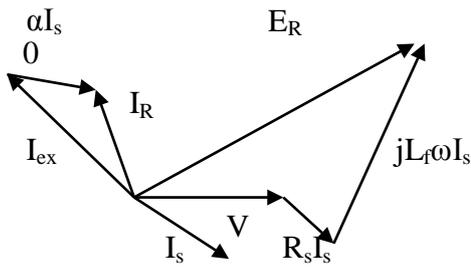


Fig. III.16: Diagramme vectoriel de réaction d'induit de modèle de Potier

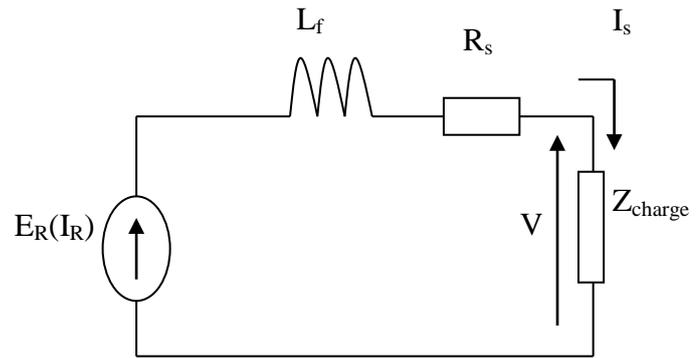


Fig.III.17: Schéma équivalent par phase d'un alternateur, modèle de Potier

La saturation magnétique rend la relation entre B et H non linéaire, il devient impossible de superposer le flux créé par l'excitation et le flux de réaction d'induit. Dans la méthode du diagramme de Potier, on combine les forces magnétomotrices (ou les courants) plutôt que les flux (ou les tensions). La force électromotrice utilisée dans le diagramme de Potier est une « force électromotrice en charge », intégrant la réaction d'induit. Elle est calculée à partir d'un « courant d'excitation résultant », en utilisant la même relation qui relie la force électromotrice à vide au courant d'excitation. Ce courant d'excitation résultant est calculé par une combinaison vectorielle du courant d'excitation et du courant induit pondéré par le coefficient de Potier (α). Ce coefficient qui est en fait un coefficient d'équivalence des forces magnétomotrice équivalente au rotor.

Cette combinaison linéaire est une hypothèse forte : le phénomène de réaction d'induit ne doit pas être influencé par la position dans l'entrefer. Autrement dit, ce modèle est surtout valable pour des machines synchrones à entrefer lisse. Dans notre cas, cette approche donne des résultats avec une précision variable. Nous avons préféré par la suite utiliser la méthode de Blondel car elle tient compte de la saillance du rotor. En effet, comme notre objectif est d'obtenir un modèle robuste en optimisation, il nous est impératif d'avoir un modèle sensible à la saillance du rotor.

III.6.3.3. Le diagramme de Blondel

Dans les alternateurs synchrones à pôles saillants, le phénomène de réaction magnétique d'induit n'est pas uniforme en tout point de l'entrefer. En effet l'épaisseur de l'entrefer varie suivant la position angulaire. Dans le cas classique, l'entrefer est beaucoup plus grand sur l'axe inter polaire que sous un pôle.

En conséquence, dans ce type de machine, l'induction magnétique dans l'entrefer engendrée par les courants d'induits est déformée par rapport à une machine à entrefer lisse. Une manière de prendre en compte ce phénomène est de décomposer la réaction d'induit dans un repère tournant synchrone avec le rotor (repère de Park). L'axe d (direct) est aligné avec l'axe polaire, alors que l'axe q (quadrature) est décalé de $\pi/2$ électrique, donc confondu avec l'axe inter polaire. Le diagramme de Blondel repose sur deux hypothèses. La première est la même que celle du diagramme de Potier, c'est-à-dire que les fuites magnétiques d'induit sont indépendantes de la saturation. Pour simplifier les calculs, une seconde hypothèse est faite : on suppose que le flux magnétique d'induit dans l'axe q est proportionnel au courant d'induit dans l'axe q, d'où la définition d'une inductance L_q .

Cette hypothèse se justifie car le circuit magnétique présente une réluctance élevée au passage du flux dans l'axe q. Les figures et décrivent respectivement le diagramme vectoriel de Blondel et le schéma électrique équivalent par phase associé.

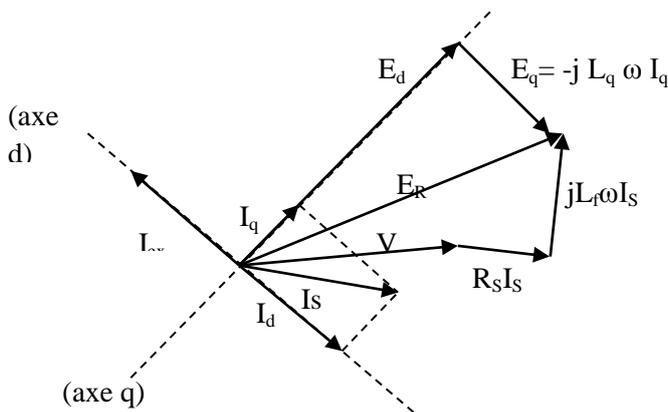


Fig. III.18: diagramme vectoriel de réaction d'induit du modèle de Blondel

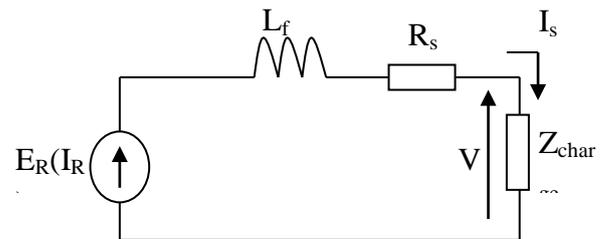


Fig. III.19: Schéma équivalent par phase d'une machine synchrone, modèle de Blondel

Le but de diagramme est de calculer la force magnétomotrice suffit, pour la déterminer, de calculer ses deux composantes (E_d et E_R) dans le référentiel de Park.

La composante en quadrature (E_q) est très facile à calculer car d'après les hypothèses, une inductance L_q a été définie. La f.e.m d'axe q a donc pour expression : $E_q = L_q \cdot \omega \cdot I_q$. Le calcul analytique de l'inductance transversale (L_q) utilisée dans notre modèle est détaillé dans l'annexe B. Pour le calcul de la composante d'axe d, c'est plus délicat. En effet, la forte saturation du circuit magnétique dans cet axe ne permet pas de faire d'hypothèse de linéarité. Nous allons donc utiliser un modèle de circuit magnétique dans l'axe d pour obtenir les flux magnétiques résultants.

En première approche, nous avons utilisé une méthode similaire au modèle de Potier. A l'aide du coefficient de Potier α , un « courant d'excitation résultant » peut être calculé :

$I_r = I_{ex} - \alpha I_d$, avec I_{ex} le courant d'excitation et I_d le courant d'induit d'axe d.

Ce « courant d'excitation résultant » est ensuite utilisé à la place du courant d'excitation dans le modèle donnant la f.e.m à vide pour déterminer la composante E_d . Cette méthode est intéressante en première approche, mais elle ne prend pas en compte la majoration des flux de fuites créée par une réaction d'induit démagnétisant.

Pour calculer la composante E_d , nous avons décidé, au final, d'élaborer un modèle du circuit magnétique prenant en compte séparément le courant d'excitation et le courant d'induit d'axe d. [40]

III.7. Expression du couple

Il est possible d'établir une première expression du couple en réalisant un bilan des puissances au niveau de la machine. En négligeant toutes les pertes l'équation de la puissance (2.2) s'écrit tel-que :

$$P_{\text{électrique}} = P_{\text{mécanique}}$$

La f.e.m E s'écrit sous la forme de :

$$e(t) = n_s \frac{d\phi_r}{dt} \quad \text{III.33}$$

$$C. \omega_s = 3 E I \cos(\phi t) \quad \text{III.34}$$

Le couple est donc proportionnel à l'angle de déphasage. Pour le contrôle du couple il faudrait passer par le contrôle d'angle.

III.8. Fonctionnement dans les quatre quadrants

Une des particularités de la machine synchrone est sa capacité à fonctionner dans les quatre quadrants électriques. Il est en effet possible de rendre à volonté la machine inductive ou capacitive, que ce soit en fonctionnement moteur ou générateur. Il suffit pour cela de jouer sur l'amplitude de E , c'est-à-dire sur le courant d'excitation rotorique.

On obtient alors les diagrammes de Behn-Eschenbourg suivants :

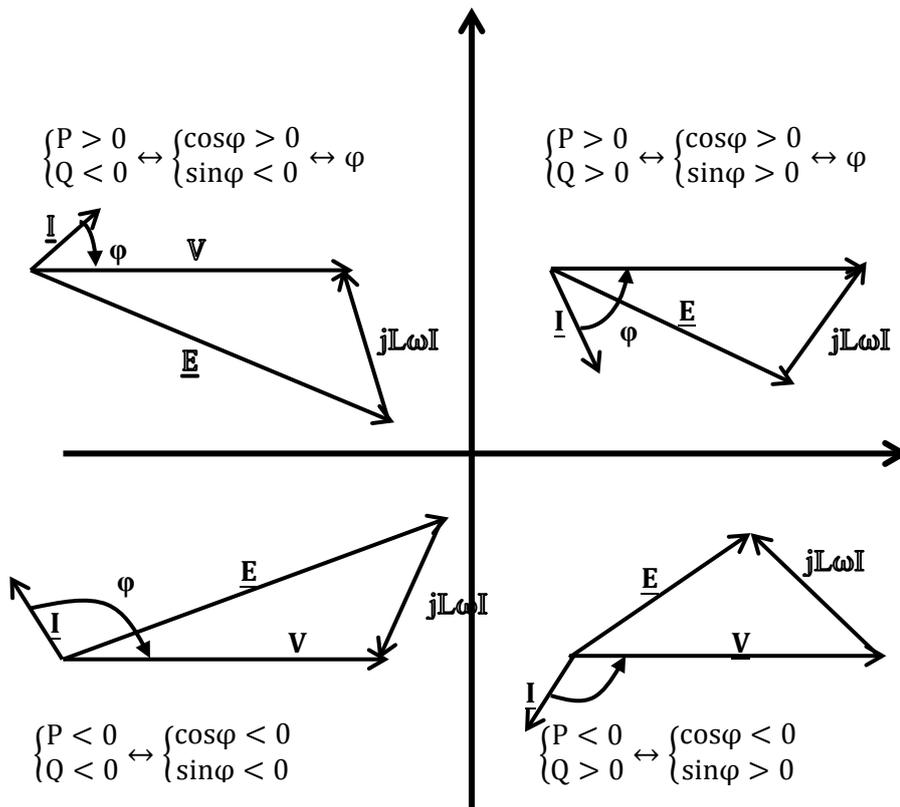


Fig. III.20: Les quatre quadrants de fonctionnement

Il est possible de constater que lors d'un fonctionnement capacitif, la f.e.m. E est supérieure à la tension d'alimentation, on dit que la machine est surexcitée. Lors d'un fonctionnement inductif, la f.e.m. E est inférieure à la tension d'alimentation, on dit que la machine est sous-excité. [41]

III.9. Détermination des éléments du schéma équivalent [42]

Pour déterminer les éléments du schéma équivalent, il faut trois essais :

- Essai à courant continu, on détermine la résistance R_s par la méthode volt-ampère-métrique
- Essai à vide $E_0 = f(I_e)$, l'alternateur étant entraîné à sa vitesse de rotation nominale.
- Essai en court-circuit, réalisé à la vitesse de rotation nominale, sous excitation réduite.

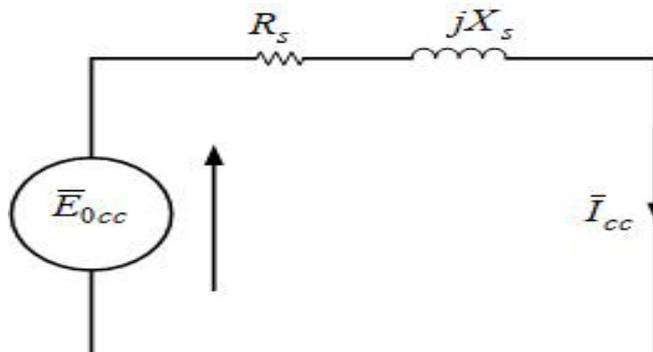


Fig.III.21: Schéma équivalent en court-circuit

On écrit la loi des mailles à partir du schéma précédent

$$E_{0cc} = I_{cc} \cdot (R_s + j \cdot X_s) \tag{III.35}$$

Donc la réactance synchrone est

$$X_s = \sqrt{\left(\frac{E_{0cc}}{I_{cc}}\right)^2 - R^2} \tag{III.36}$$

Remarque : si on néglige R_s et à courant d'excitation constant, le courant de court-circuit est indépendant de la vitesse :

$$I_{cc} \approx \frac{E_0}{l\omega} = \frac{k.N.\phi_0.f}{1.2\pi.f} \tag{III.37}$$

III.10. Caractéristiques d'un alternateur

Elles lient entre elles les grandeurs électriques de la machine : V , I et I_s

a) Caractéristiques externes $V = f(I)$ à $I_e = \text{cte}$

Le but est de tracer l'allure de la tension V en fonction de courant I à I_e et φ fixés

Les données sont I_s , $\cos(\varphi)$ et n_s , on connaît aussi la caractéristique interne $E_0 = f(I_e)$

b) caractéristique en charge

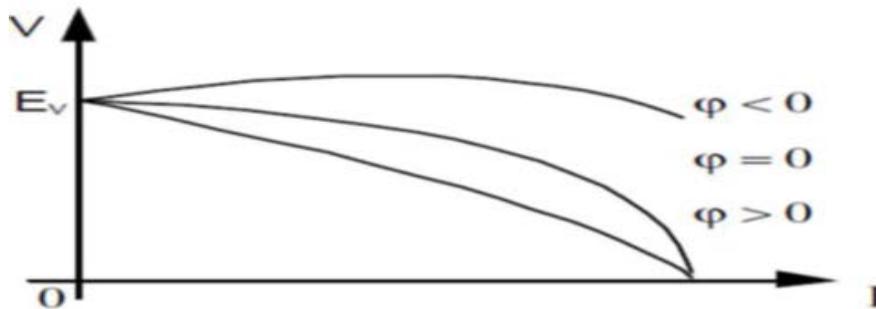


Fig. III.22: Caractéristique en charge

c) Caractéristique de réglage $I_e = f(I)$ à $V = \text{cte}$

On la trace généralement pour $V = V_n$

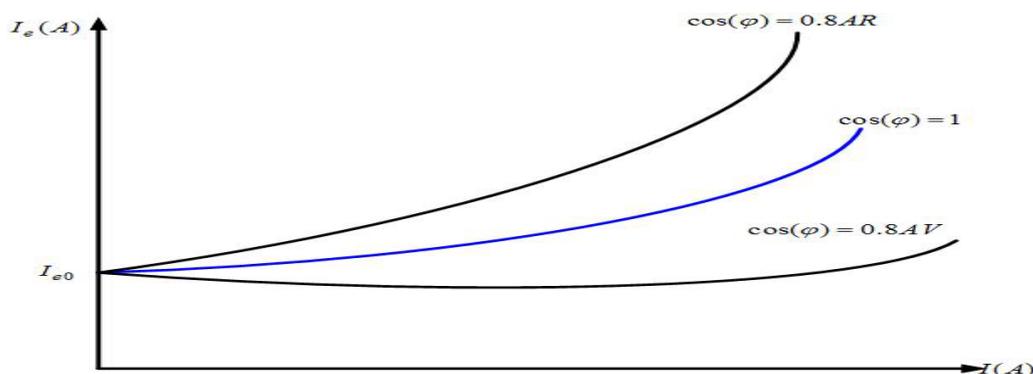


Fig. III.23: Caractéristique de réglage [43]

III.11. L'amélioration des caractéristiques des alternateurs

Elle résulte:

- d'une augmentation progressive de l'induction B dans les circuits magnétiques et de la densité de courant dans les conducteurs ou charge linéique (ampère tour par mètre).
- La masse spécifique d'un alternateur : 1.5 kg/kVA en 1950 est passée à 0.45 kg/kVA en 1980.
- Malgré les rendements élevés de ces alternateurs (0.95 à 0.98) les pertes, inhérentes à toute machine électrique, sont considérables.

Pour un alternateur de 1485 MW des pertes de 2% représentent 30000 KW !!

- Pour dissiper la chaleur correspondante plusieurs système de refroidissement sont mis en jeu : par eau et par hydrogène.
- Enfin, l'alimentation en courant continu des inducteurs est assurée Par différents modes d'excitation. [44]

III.12. Conclusion

Tout au long de ce chapitre nous avons passé en revue les alternateurs synchrones de la production l'énergie électriques. Dans cette parté, nous avons étudions les différents essais et caractéristiques des alternateurs.

Il y a d'autres fonctionnements de machines synchrones qui s'appelé moteurs synchrones, on va voir ce type de fonctionnement .dans le prochaine chapitre.

Etude Expérimentale sur la machine synchrone

IV.1. Introduction

Les alternateurs des centrales électriques sont couplés sur le réseau électrique. Ce dernier se comporte comme un générateur triphasé très puissant imposant les caractéristiques de tension (fréquence, valeur efficace,...) à tout alternateur synchrone qui lui est connecté.

Dans ce chapitre, nous étudions le comportement de la machines synchrone, nous avons fait des essais expérimentaux sur la machine synchrone, en fonctionnement moteur et alternateur. Couplage d'un alternateur sur le réseau électrique.

IV.2. Objectifs

IV.2.1. Fonctionnement sur réseau fixe (fréquence et valeur efficace des tensions statoriques)

La machine utilisée sa plaque signétique est la suivante

Machine synchrone à pôle saillant.

Y 380	2,8/1,6A
1KVA/0,8KW	$\cos \varphi$ 0,8 -1- 0,8
1500 min ⁻¹	50 Hz
E_{rr} 220	I_{Err} 0,6A
I_S .K.I B IP 20	C_A C_B
Typ SE 2662-5M	VDE0530

IV.2.2. Schéma de câblage

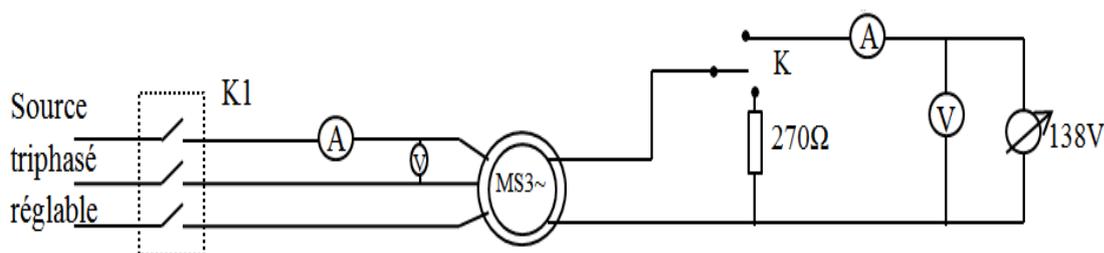


Fig.IV.1 : schéma de câblage

Côté rotor, l'interrupteur à trois positions, permet de connecter l'enroulement d'excitation sur la résistance (fonctionnement en asynchrone) ou sur l'alimentation continue réglable (synchrone).

IV.2.3. Mode opératoire

Pour démarrer le moteur synchrone, il faut passer en moteur asynchrone, car le moteur synchrone ne présente aucun couple au démarrage. Pour démarrer en moteur asynchrone, il faut que le stator parcouru par des courants triphasés équilibrés engendre un champ tournant.

Pour qu'un couple non nul existe, il faut un champ tournant rotorique. Ce champ est dû à la circulation de courants dans l'enroulement «d'excitation» c'est pour cela qu'on place une résistance. Le couple résultant de l'interaction entre les deux champs fait démarrer la machine.

Remarque

Eventuelles précautions particulières :

Régler 138V avant toute chose, bien écouter le bruit du moteur. Basculer rapidement le commutateur K1 pour passer de la résistance à l'alimentation toujours vérifier le courant d'excitation qui ne doit pas dépasser 0.6A.

En effet, pour réussir à synchroniser, la roue polaire doit être parcourue par un courant.

Pour tracer les courbes de Mordey, il faut un ampèremètre pour relever l'intensité statorique.

Courbes de Mordey : réseau de courbes tracées à puissance utile constante. Elles représentent l'évolution de l'intensité efficace des courants statoriques en fonction de l'intensité du courant d'excitation. En prendra le tiers, les deux tiers de la puissance nominale.

Donc sur la plaque signalétique du moteur on a $P=800W$, le tiers= $266W$ et les deux tiers= $533W$.

Il faut utiliser le Mode mécanique, brancher le frein à poudre ainsi que le capteur de couple et la dynamo tachymétrique sur celui-ci on observe la puissance nominale, la vitesse et on règle le couple afin d'obtenir une valeur de puissance égale à $800W$. Il faut toutefois surveiller l'intensité d'excitation et le bruit du moteur car si le couple résistant est supérieur au couple moteur, le moteur est à la limite du calage et l'intensité d'excitation augmente, il faut donc dans ce cas, soit augmenter la tension d'alimentation rotorique, soit couper l'alimentation statorique.

Pour relever les valeurs de I_S et I_{EX} , on diminue progressivement la tension rotorique (pour chaque puissance) et on regarde la valeur de chaque intensité cependant il y a une certaine limite à ne pas dépasser quand on diminue la tension rotorique, car sinon le moteur est à la limite du calage.

Pour :

$$P_u=1000W \quad P_a=420W$$

$$n=1527\text{tr/min} \quad C=6.4\text{N.m}$$

Pour :

$$P_u=666W \quad P_a=295W$$

$n=1522\text{tr/min}$ $C=4.1\text{N.m}$

Pour :

$P_u=333\text{W}$ $P_a=170\text{W}$

$n=1528\text{tr/min}$ $C=2.1\text{N.m}$

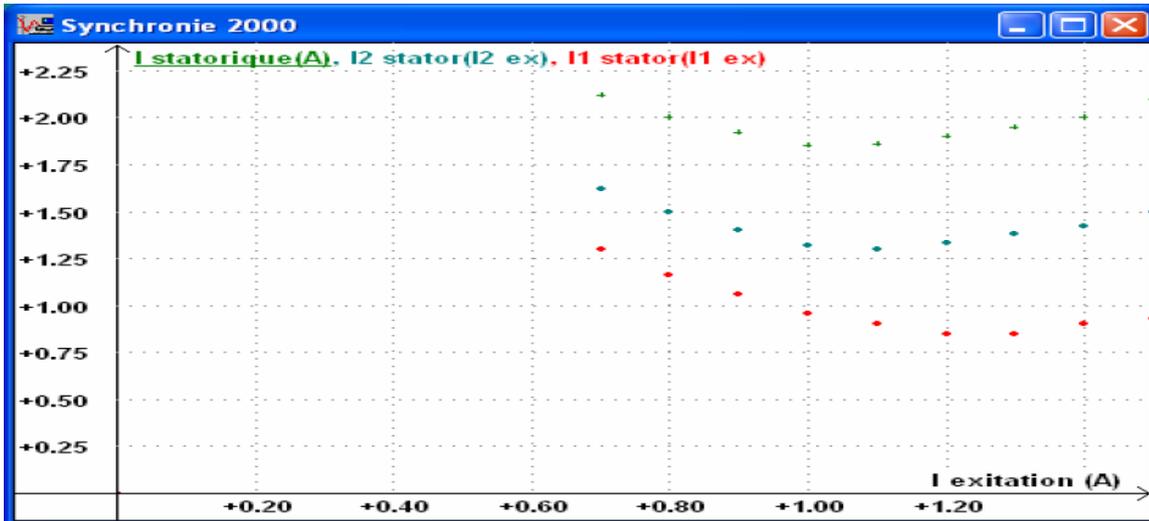


Fig.IV.2 : Courbe de Mordey

IV.3. Circuit à réaliser

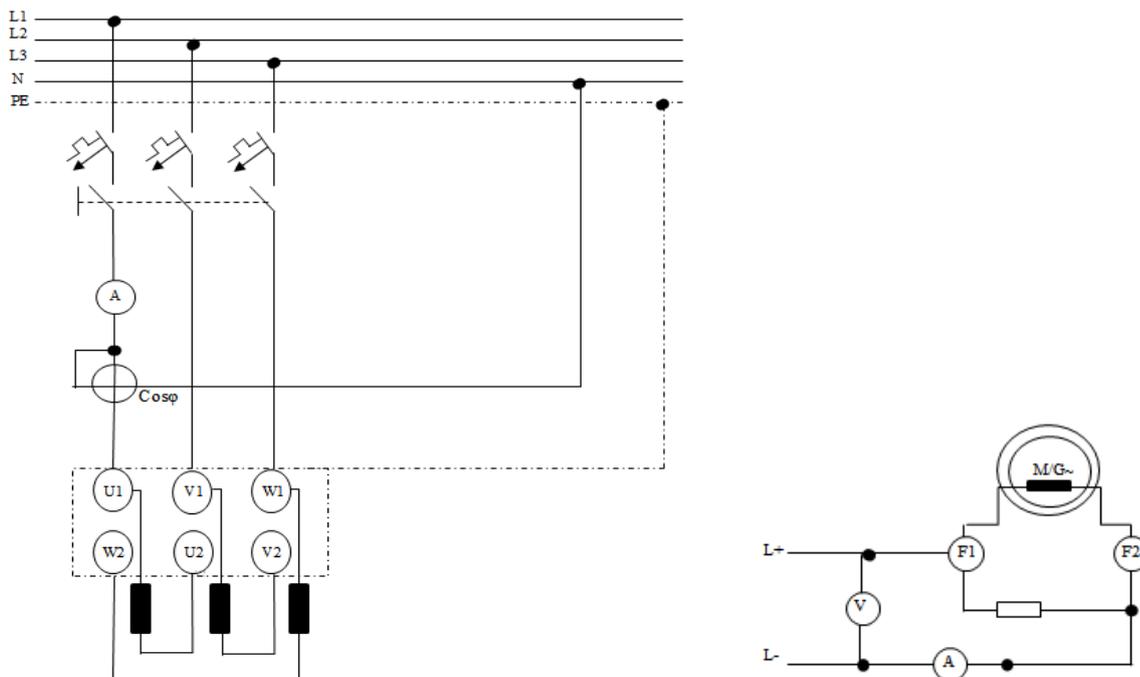


Fig.IV.3 : un moteur synchrone connecté au réseau

Dans un moteur synchrone, on augmente la tension statorique jusqu'à ce que l'on arrive à une valeur proche de la vitesse de synchronisme n_s et on augmente la tension continu jusqu'à 160V, on a donc synchronisé. La machine fonctionne donc en synchrone on définit.

Le fonctionnement est possible, seulement lorsque le rotor est accéléré jusqu'à la vitesse de synchronisme suivie par l'application d'une excitation, une fois que cette vitesse est atteinte.

Une résistance à la construction en a la fonction de la liaison de court-circuit. Pendant la phase de démarrage, la tension d'excitation est interrompue par un contact normalement fermé et ensuite commuté dans le circuit lorsque la vitesse asynchrone, la plus élevée a été atteinte.

Pour obtenir un transfert facile de asynchrone en cours d'exécution trop synchrone, le moteur triphasé doit être démarré avec à aucune charge appliquée.

Sur l'unité de commande, le mode de fonctionnement, $M = \text{constante}$ devrait être choisie depuis le moteur synchrone à courant triphasé a une vitesse constante de rotation, jusqu'à ce qu'il se retire de synchronisme, provoqué par une charge excessive.

On ajuste l'unité de commande sur :

vitesse $n=1500\text{tr}/\text{min}$

Couple $M=5\text{Nm}$

Mode de fonctionnement $M=\text{constant}$

On Règle la tension de 40V. On actionne le bouton-poussoir sur la planche à bornes du moteur et mettez le moteur en marche. On maintenu l'interrupteur enfoncé jusqu'à ce que le moteur a atteint sa vitesse maximale asynchrone. Maintenant, on ferme le commutateur de sorte que le moteur tourne en synchronisme.

Sur l'unité de commande, on définit les valeurs de couple comme indiqué dans le tableau IV.1, à compter de 0.5Nm. On mesure le courant de stator et la vitesse. On entre les valeurs dans le tableau.

On règle la tension de l'excitation à 70V. Sur l'unité de commande, on définit les valeurs de couple comme indiqué dans le tableau IV.2. On mesure le courant de stator et la vitesse. Comme il est indiqué dans le tableau.

A l'unité excitatrice, on règle la tension d'exciter à 110V. Sur l'unité de commande, on définit les valeurs de couple comme indiqué dans le tableau IV.3. On mesure le courant de stator et la vitesse. Les mesures sont présentées sur le tableau.

On Décrit la réponse du moteur triphasé synchrone à la variation du courant d'excitation et une augmentation des conditions de charge.

TableauIV.1. : les résultats obtenus pour la tension excitation 40V

U_{exc} (V)	40V			
M (Nm)	0.5	1.5	2.0	2.5
n (tr/min)	1500	1500	1500	*
I (A)	0.4	0.71	0.94	*

TableauIV.2. : les résultats obtenus pour la tension excitation 70V

U_{exc} (V)	70V				
M (Nm)	0.5	1.5	3.0	4.0	4.5
n (tr/min)	1500	1500	1500	1500	*
I (A)	0.7	0.8	1.1	1.42	*

TableauIV.3. : les résultats obtenus pour la tension excitation 110V

U_{exc} (V)	110V					
M (Nm)	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
n (tr/min)	1500	1500	1500	1500	1500	*
I (A)	1.15	1.22	1.34	1.5	1.7	*

Si le moteur synchrone triphasé est trop lourdement chargé, il sort de synchronisme. Une augmentation de l'excitateur produit un déplacement du point de pull-out, ce qui entraîne des valeurs de couple supérieures. L'augmentation du courant du moteur est pratiquement linéaire avec le couple de charge.

IV.4. Etude d'un alternateur par la maquette didactique

L'objectif de cette partie du travail est d'étudier le comportement de l'alternateur synchrone en fonctionnement isolé, au raccordement d'une charge ohmique et inductive. Pour relever les caractéristiques en charge $U=f(I)$ pour une vitesse de rotation maintenue constante et un courant d'excitation constant, le montage est illustré sur la figure IV.4.

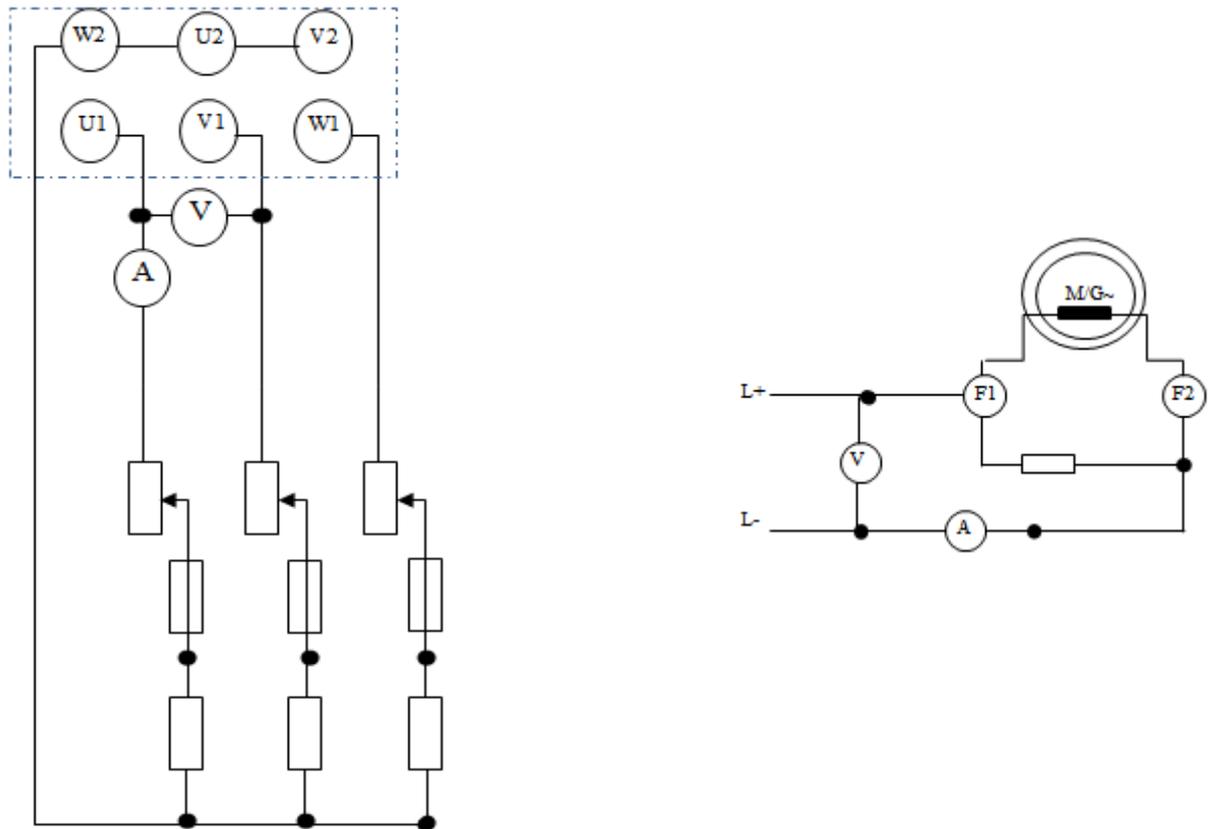


Fig.IV.4 : alternateur en fonctionnement isolé

IV.4.1. Matériel utilisé dans cette manipulation est le suivant :

Les paramètres de la machine étudiée

Plaque signétique

Typ 73307	class 1.0
Y/ Δ 400/230V	1.52/2.66A
0.8KVA/0.8KW	$\cos\varphi=0.8-1-0.8$
1500tr/min	50Hz
$V_{\text{eff}}=220\text{V}$	$I_{\text{MAX}}= 0.6\text{A}$
IP20	82847 VDE0530

01Système d'évolution des machines électrique.

01Alimentation courant continue.

01 Charge ohmique.

01 Charge inductive.

01 Charge capacitive.

02 Appareils de mesure de la valeur efficace(RMS).

01 Voltmètre 0-600V

02 Ampèremètres 0-5A

Les consignes de sécurité sont :

Pour brancher les machines, il importe de veiller à ce que les câbles d'expérience soient posés correctement. Ils ne doivent en aucun cas entrer en contact avec des pièces en rotation.

Les machines doivent être alignées sur un même plan et les plaques supports vissées les unes aux autres. Les accouplements et les bouts d'arbre libres doivent être protégés par les capots prévus à cet effet de manière à empêcher tout contact inopportun avec pièce en rotation.

IV.4.2. 1^{ère} expérience

On commence par utiliser la charge ohmique comme consommateur. Elle est branchée (comme tout autre consommateur) en couplage étoile. Avant de commencer les mesures, il convient de régler une charge de 100% et entraînez l'alternateur avec la vitesse de rotation constante $n=1500\text{tr/min}$. Excitez la machine avec la valeur nominale $I_{EN}=0,6\text{A}$.

Réduisez la résistance en partant de la valeur 100% de la charge ohmique conformément au tableau 01 puis mesurez les valeurs correspondantes de la tension et de courant.

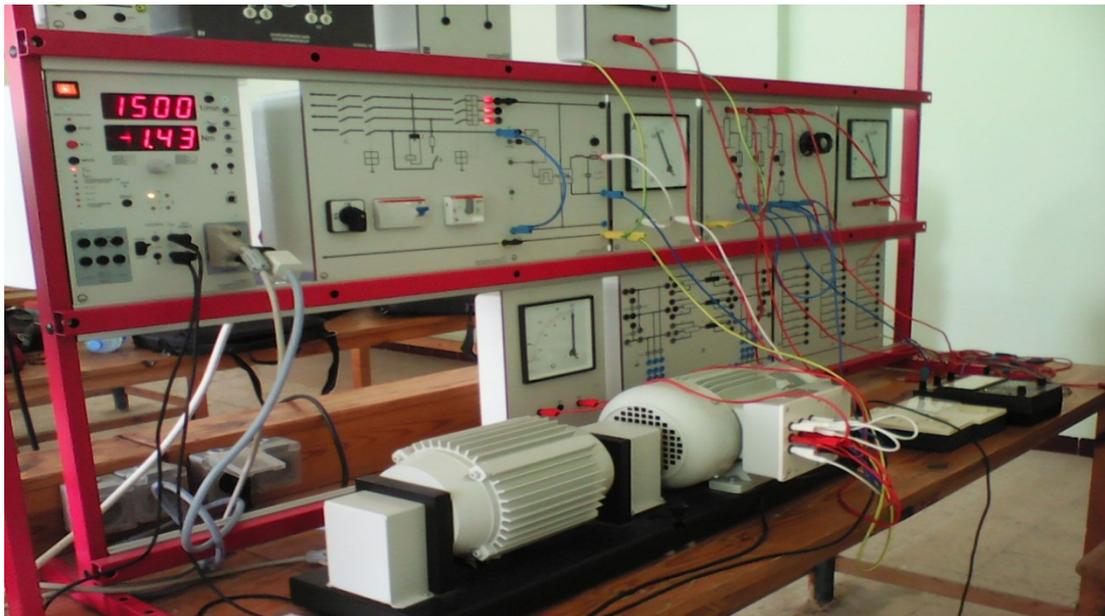


Fig.IV.5 : alternateur alimente une charge résistive

Résultats obtenues d' après les mesures

Tableau IV.4 : résultats de la première expérience

R%	100	80	60	40	20	10
U_1 (v)	400	400	390	370	260	225
U_2 (v)	410	410	400	370	255	223
I(A)	0.23	0.25	0.27	0.35	0.70	0.74
P(W)	51	59	65	85	100	100
Q(VAR)	0	0	0	0	0	0

Les valeurs sont finalement données en référence à la tension nominale et au courant nominal de la machine :

$$I_{EX}=0.76A, U_N=400V, I_N=0.53A$$

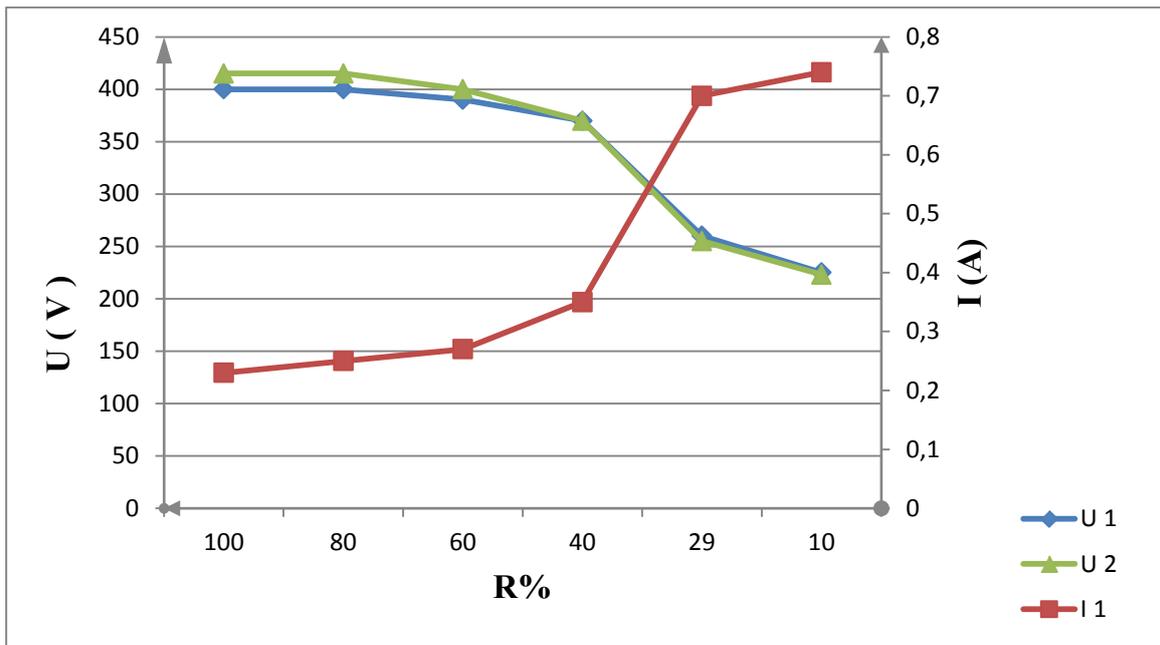


Fig.IV.6 : Courbe de U1, U2 et I1 en fonctions de la charge résistive.

On observe qu'il y a une augmentation de courant de charge I1, ce qui est évident lorsque la charge est élevée par contre un chute de tension au niveau de la tension d'arrivé.

IV.4.3. 2^{ème} expérience

On remplace la charge ohmique par la charge inductive (couplage étoile) et on recommence la série de mesures précédente pour les valeurs d'inductances données.

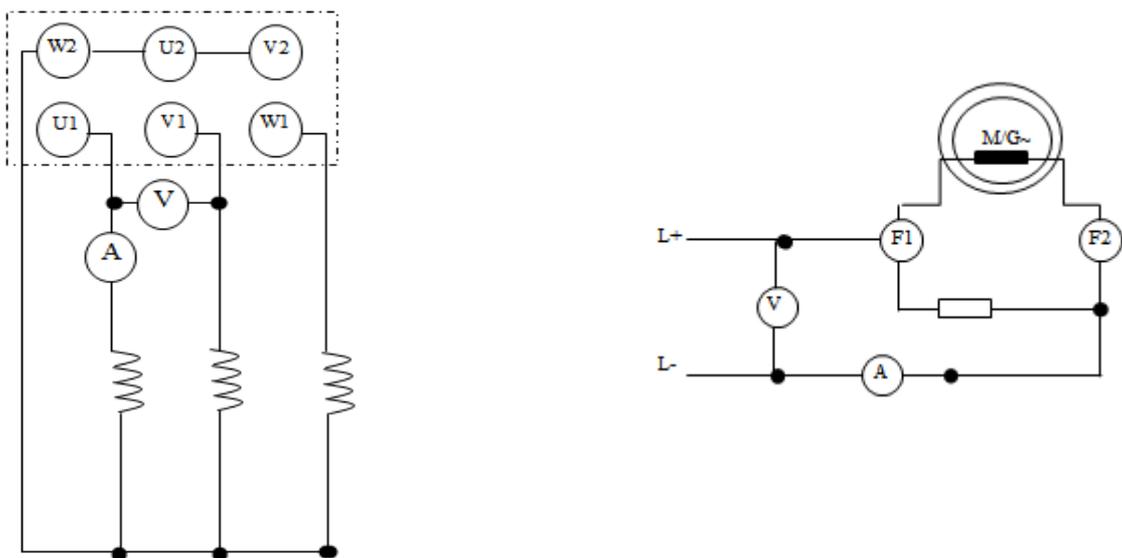


Fig.IV.7 : alternateur alimente une charge inductive

Fig.VI.8 : charge inductive

Résultats obtenues d' après les mesures

L(H)	6	4.8	2.4	1.2	0.8	0.6	0.4
U_1 (v)	400	400	370	230	292	268	180
U_2 (v)	420	410	370	310	290	265	175
I(A)	0.085	0.1	0.19	0.32	0.36	0.43	0.59
P(W)	3.3	4	6	7	7.2	9	7
Q(VAR)	18	24	39	57	61	65	60

Tableau IV.5 : résultat de deuxième expérience

Fig.IV.9 : courbe de U_1 , U_2 et I_1 en fonctions de la charge inductive

Remarque :

En présence d'un système automatique talque (AVR) de voltage réguletor la tension augment jusqu'au point de la stabilité.

IV.4.4. 3^{ème} expérience

On Remplace la charge inductive par la charge capacitive (couplage étoile) et on recommence la série de mesures précédente pour les valeurs capacitance données. les mesures avec de faibles valeurs capacitance devront être effectuées rapidement.

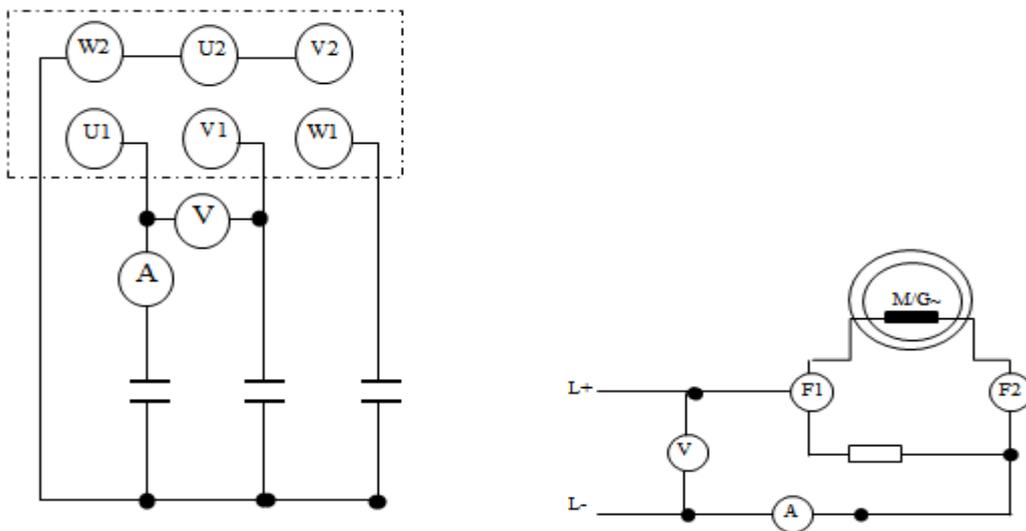


Fig.IV.10 : alternateur alimente une charge capacitive

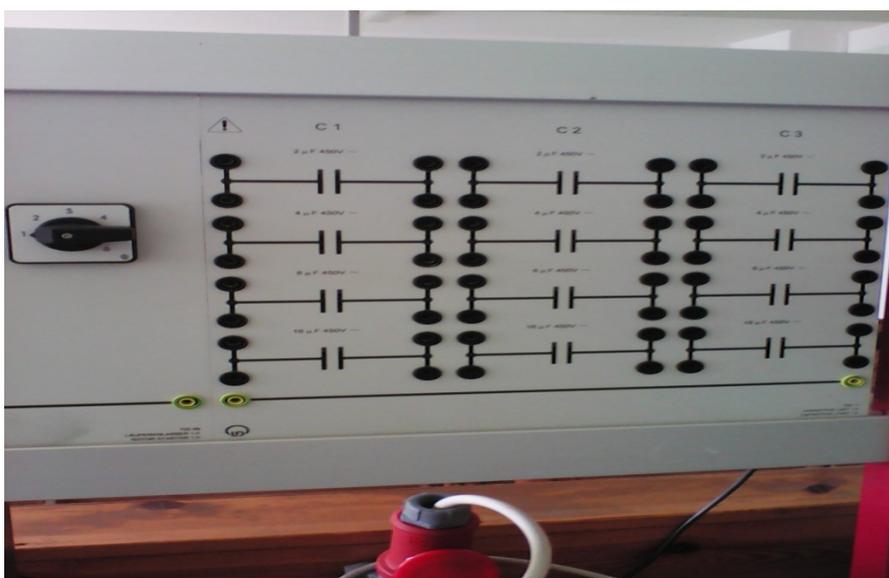


Fig.VI.11 : charge capacitive

Résultats obtenues d'après les mesures

Tableau IV.6 : résultat de troisième expérience

C(μ F)	2	4	6
U ₁ (v)	300	370	400
U ₂ (v)	310	380	410
I(A)	0.11	0.28	0.44
P(W)	0	0	0
Q(VAR)	20	60	100
I _{EX} (A)	0.34	0.34	0.28

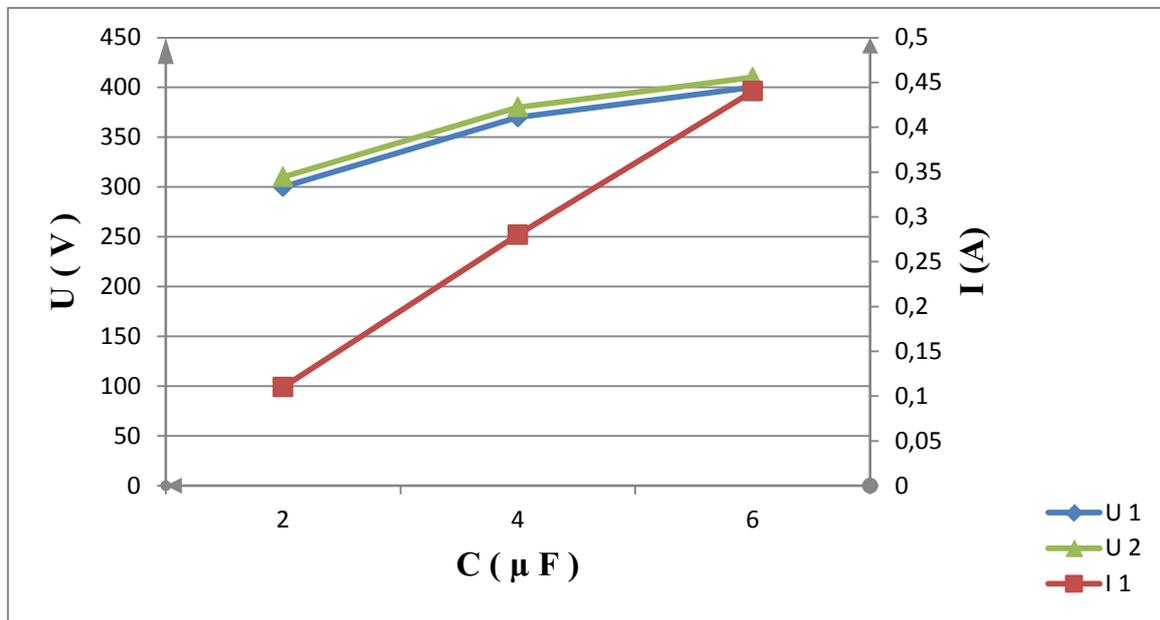


Fig.IV.12 : courbe de U1, U2 et I1 en fonctions de la charge capacitive

Commentaire :

Pour la charge résistive et capacitive, lorsque l'on charge la machine 10% la tension augmente car on relève le « facteur de puissance ».

Entre 50 et 100% de charge, la machine se démagnétise car le courant chute.

Conclusion 01 Comparaison des diminutions pour les charges « résistives » et « résistives et inductives ». Le terme « facteur de puissance » est mal utilisé ici : la charge capacitive « compense » la réactance synchrone.

On distingue clairement les effets démagnétisant des charges « résistives » et a fortiori « résistives et inductives » : à intensité statorique efficace égale, la tension est plus faible pour la charge « résistive et inductive » que pour la charge « résistive ».

La charge « capacitive et résistive » est quant à elle magnétisante.

IV.5. Couplage d'une machine synchrone au réseau

Nous avons couplé la machine synchrone au réseau et la faire fonctionner en alternateur

-Le réseau alternatif étant constitué d'un alternateur triphasé nous avons un réseau réversible en tension et en courant.

-Le réseau continu en tension et en courant est constitué d'un redresseur.

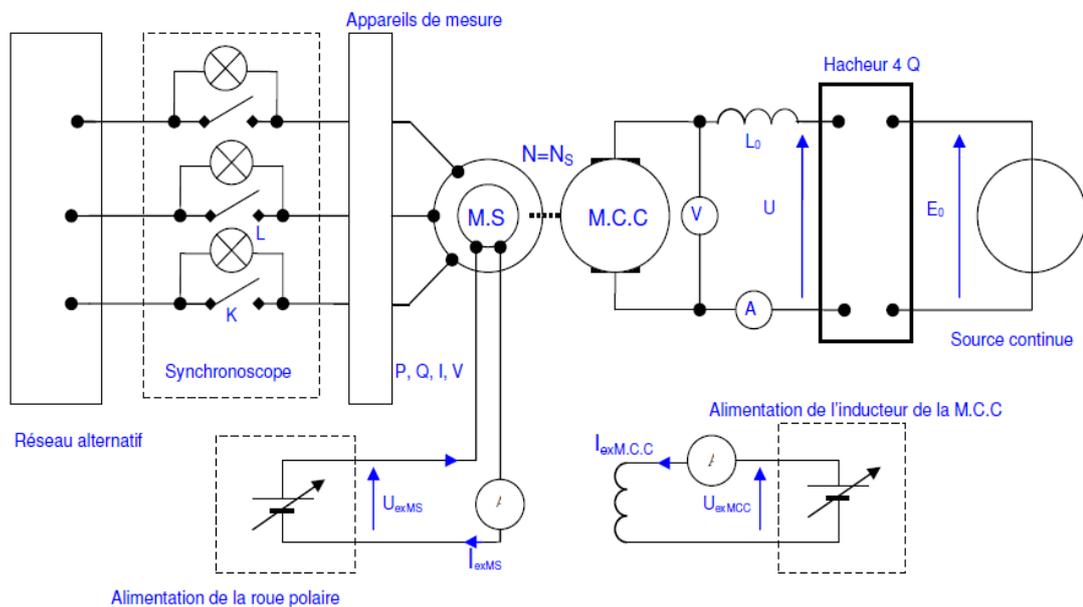


Fig.IV.13 : protocole de couplage d'une machine synchrone au réseau

IV.5.1. Protocole

La machine synchrone est couplée en étoile (on travaille dans les conditions nominales). Les interrupteurs du synchronoscope sont ouverts. La valeur efficace tension fournie par le réseau alternatif est notée Vers # 230V.

IV.5.2. Conditions de couplage

Nous voulons que les deux réseaux alternatifs présentent des tensions de valeurs efficaces identiques et en phases. Pour réaliser ces conditions vous devez faire plusieurs réglages :

- Réglage de la vitesse du groupe aux alentours de la vitesse de synchronisme ($N_s=1500\text{tr.min}^{-1}$).

On démarre la machine à courant continu en réglant le rapport cyclique du hacheur.

- Réglage de la valeur efficace de la tension (entre phase et neutre EMS) fournie par la machine synchrone :

On règle le courant d'excitation I_{ex} MS jusqu' à atteindre $E_{MS} \# V_{res}$.

- Vérification de l'ordre des phases du système de tensions triphasées fournies par la machine synchrone et celui du réseau alternatif.

Lorsque les « feux » des lampes sont dits « battants » l'ordre des phases des deux systèmes de tensions triphasées sont identiques.

Dans le cas contraire les « feux » sont dits « tournants » : le couplage de la machine dans ces conditions pourrait endommager le réseau et la machine ; pour rétablir l'ordre des phases il suffit de croiser deux fils.

-Lorsque les trois conditions citées ci-dessus sont réunies les lampes ne sont pas forcément éteintes. Nous pouvons obtenir l'extinction totale des feux en agissant sur le courant d'excitation de la machine synchrone et en ajustant la vitesse du groupe (on règle I_{ex} M.C.C). Lorsque les lampes sont éteintes nous pouvons fermer les interrupteurs du synchronoscope. La machine est couplée au réseau.

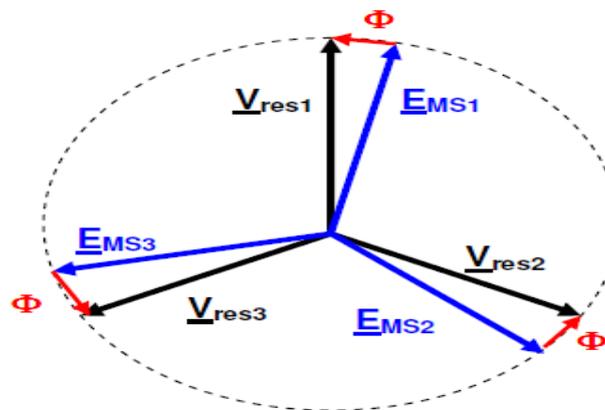


Fig.IV.14 : l'ordre des phases du système de tensions triphasées

Remarque : Il arrive que dans les conditions idéales de réglage ($N = N_s$ et $EMS = V_{res}$) les lampes soient toujours allumées.

Cette situation peut arriver s'il existe un déphasage (Φ) entre les tensions fournies par le réseau et celles composées par la machine synchrone.

Pour annuler ce déphasage (et donc mettre en phases les tensions du réseau et celles de la machine) il suffit de faire varier lentement la vitesse de rotation du groupe et observer un battement très lent des feux des lampes. Dès que les lampes s'éteignent on peut coupler la machine au réseau.

Lorsque la machine synchrone est couplée au réseau nous pouvons maîtriser le transfert de puissance active et réactive entre la machine et le réseau en agissant indépendamment sur le courant d'excitation de la machine à courant continu ($I_{ex} \text{ MCC}$) et sur le courant d'excitation de la machine synchrone ($I_{ex} \text{ MS}$).

Considérons le schéma de montage de la partie IV :

-1ère Hypothèse : On suppose que le courant d'excitation de la machine synchrone est maintenu constant ($I_{ex} \text{ MS} = \text{constant}$).

Le réglage de $I_{ex} \text{ MCC}$ fixe la valeur de la force électromotrice $EMCC = k \cdot \Phi (I_{ex} \text{ MCC}) \cdot \Omega_s$ et donc celle du courant d'induit I_{MCC} .

_ Si $EMCC > U_{moy}$ alors le courant d'induit I_{MCC} est négatif : la machine à courant continu fonctionne en génératrice donc la machine synchrone en moteur (**avec $PMS > 0$**).

_ Si $EMCC < U_{moy}$ alors le courant d'induit I_{MCC} est positif : la machine à courant continu fonctionne en moteur donc la machine synchrone en alternateur (**avec $PMS < 0$**).

Observation : Par le biais du courant d'excitation $I_{ex} \text{ MCC}$ nous pouvons gérer le transfert de la puissance active entre le réseau et la machine synchrone. Nous allons pouvoir montrer le fonctionnement moteur et générateur de la machine synchrone.

-2nd hypothèse : On suppose que le courant d'excitation de la machine à courant continu est maintenu constant ($I_{ex} \text{ MCC} = \text{constant}$). Le réglage de $I_{ex} \text{ MS}$ fixe la valeur de la force électromotrice $EMS = k \cdot \Phi (I_{ex} \text{ MS}) \cdot \Omega_s$ et donc celle du courant d'induit I_{MS} de la machine synchrone. EMS se déplace sur une horizontale dans le plan (P, Q) car la puissance active est constante.

Nous pouvons passer de $Q > 0$ à $Q < 0$ en agissant sur le courant d'excitation ($I_{ex} \text{ MS}$).

$I_{ex} \text{ MS}$.

Par le biais du courant d'excitation $I_{ex} \text{ MCC}$ nous pouvons gérer le transfert de la puissance active entre le réseau et la machine synchrone.

IV.5.3. La vérification que l'ordre de succession des phases est correct

L'ordre de succession est ici vérifié par des ampoules supportant $2V_{res}$, mais on peut également utiliser un détecteur d'ordre de phases ou un oscilloscope pour vérifier $\varphi_{v1alt}/v2alt = \varphi_{v1res}/v2res$:

-Si l'ordre de succession des phases est le même

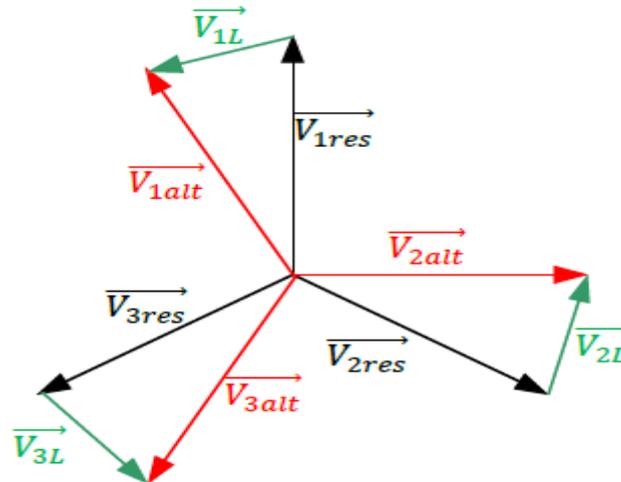


Fig.IV.15 : le même ordre des phases

Les 3 tensions aux bornes des lampes sont identiques : elles s'éteignent et s'allument en même temps (feux fixes).

Si l'ordre de succession des phases est inversé

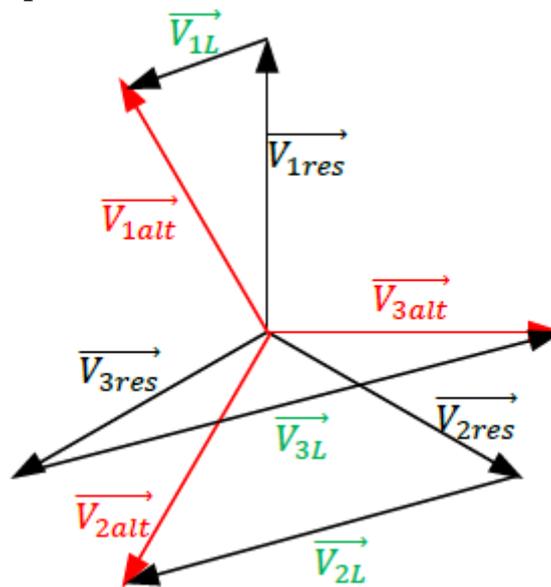


Fig.IV.16 : l'inverse des ordres des phases

Les 3 tensions aux bornes des lampes sont différentes : elles s'éteignent et s'allument à tour de rôle (feux tournants).

Plaques signalétiques

Machine synchrone

220V/380V

3,1A/1,8A ; $S_n = 1,1$ kVA

$f = 50$ Hz; $N_s = 1500$ tr/min

$U_{ex} MS = 70V$ et $I_{ex} MS = 2,6$ A

Machine à courant continu

$U = 220V$

$I = 7,2A$

$P_u = 1,2kW$

Excitation : $U_{ex} \text{ MCC} = 220V$; $I_{ex} \text{ MCC} = 0.65A$

IV.5.4. Couplage de synchronisation

Outre le démarrage en asynchrone, il y a aussi la possibilité de coupler une machine synchrone déjà excitée à la vitesse de rotation nominale sur le réseau triphasé. Pour ce faire, la tension de l'alternateur (module et phase), la fréquence et l'ordre de succession des phases (c.-à-d. la direction du champ tournant) doivent coïncider avec les valeurs correspondantes du réseau. La surveillance de ces grandeurs est assurée par des couplages de synchronisation spéciaux décrits ci-après.

Pour comparer la tension de l'alternateur avec celle du réseau, la méthode la plus simple consiste à recourir à des lampes de synchronisation situées entre le réseau et l'alternateur. Comme la tension par phase double se manifeste au niveau des lampes pendant le processus de synchronisation en cas de position de phase défavorable entre le réseau et l'alternateur, deux lampes sont respectivement branchées en série pour ainsi former une paire. Pour ledit couplage à l'extinction, les lampes sont à chaque fois entre les mêmes phases du réseau et de l'alternateur. La machine peut-être couplée à l'instant où toutes les lampes s'éteignent simultanément. Avec ledit couplage à l'allumage, deux des trois lampes sont branchées à des phases différentes. Si le circuit est réalisé correctement, le cône lumineux des trois lampes tourne dans le sens horaire tant que la vitesse de rotation de l'alternateur est trop élevée. S'il tourne dans le sens trigonométrique, la vitesse de rotation est alors trop faible. La mise en parallèle peut avoir lieu lorsque le cône lumineux s'immobilise et que la lampe est éteinte dans le couplage d'extinction.

La mise en parallèle est aussi très souvent établie à l'aide d'un synchronoscope doté d'un équipage de mesure indiquant le déphasage des deux tensions par le biais d'une aiguille en déplacement. Le sens de déplacement de l'aiguille renseigne sur la vitesse de fonctionnement (trop ou pas assez rapide) de l'alternateur à coupler en parallèle. Si l'aiguille s'immobilise à la verticale, le couplage de l'alternateur peut alors être effectué.

Le voltmètre double et le fréquencemètre double peuvent finalement aussi être utilisés pour la synchronisation. Le voltmètre double est équipé de deux équipages de mesure indépendants et visualise simultanément la tension des deux systèmes à coupler. Un fréquencemètre double sert au contrôle de la fréquence ou de la vitesse de rotation et permet de comparer la fréquence de la machine avec celle du réseau.

Ces deux instruments servent uniquement à amener l'alternateur dans un état de fonctionnement permettant le couplage. Pour déterminer l'instant propice au couplage parallèle, il convient malgré tout d'utiliser en plus l'une des aides à la synchronisation susmentionnées. Le couplage sans à-coups n'est toutefois pas évident avec les méthodes mentionnées, si bien que dans la pratique, on recourt en principe dans les grandes centrales, à des synchroniseurs automatisés.

Le synchroniseur est un appareil de ce genre qui amène automatiquement la machine motrice à la vitesse de rotation adéquate, se charge du processus d'excitation de la machine synchrone et couple celles-ci automatiquement au réseau lorsque les deux tensions présentent la même phase.

IV.6. Comportement sur le réseau fixe

Pour finir, il s'agit d'étudier le comportement de la machine synchrone à pôles saillants sur le réseau à la tension et fréquence constantes. Si la machine est entraînée par une turbine, elle fonctionne en alternateur et fournit une puissance active au réseau. Si elle est alimentée en tension, elle se met alors à fonctionner en moteur. Si on excite la machine avec un courant supérieur à la valeur nominale du courant d'excitation, elle fournit une puissance réactive au réseau. Comme le couple d'entraînement et l'excitation peuvent être réglés indépendamment l'un de l'autre, il est possible de combiner à volonté la délivrance ou l'absorption de la puissance active et réactive dans ledit fonctionnement dans les quatre quadrants. Pour le cas du fonctionnement en alternateur à puissance nominale, on déterminera le rendement pour le comparer pour le comparer ensuite à celui obtenu en fonctionnement en moteur.

Matériel

Machine synchrone à pôles saillants.

Accouplement.

Chape d'accouplement.

Chape de bout d'arbre.

Système d'évaluation des machines électriques.

Unité de raccordement triphasée avec disjoncteur différentiel.

6 lampes, chaque deux lampe sont raccordées en série.

Fréquencemètre double.

Synchronoscope.

Alimentation de moteur courant continu.

Des câbles de sécurité noirs

Des câbles de sécurité verts/jaunes.

Des câbles d'expérience de sécurité.

Wattmètre.

Phase métré.

Appareil de mesure de la valeur efficace (RMS).

Comme alternateur à l'appareil de mesure de la valeur efficace :

Voltmètre 0-400V

Ampèremètre 0-1A

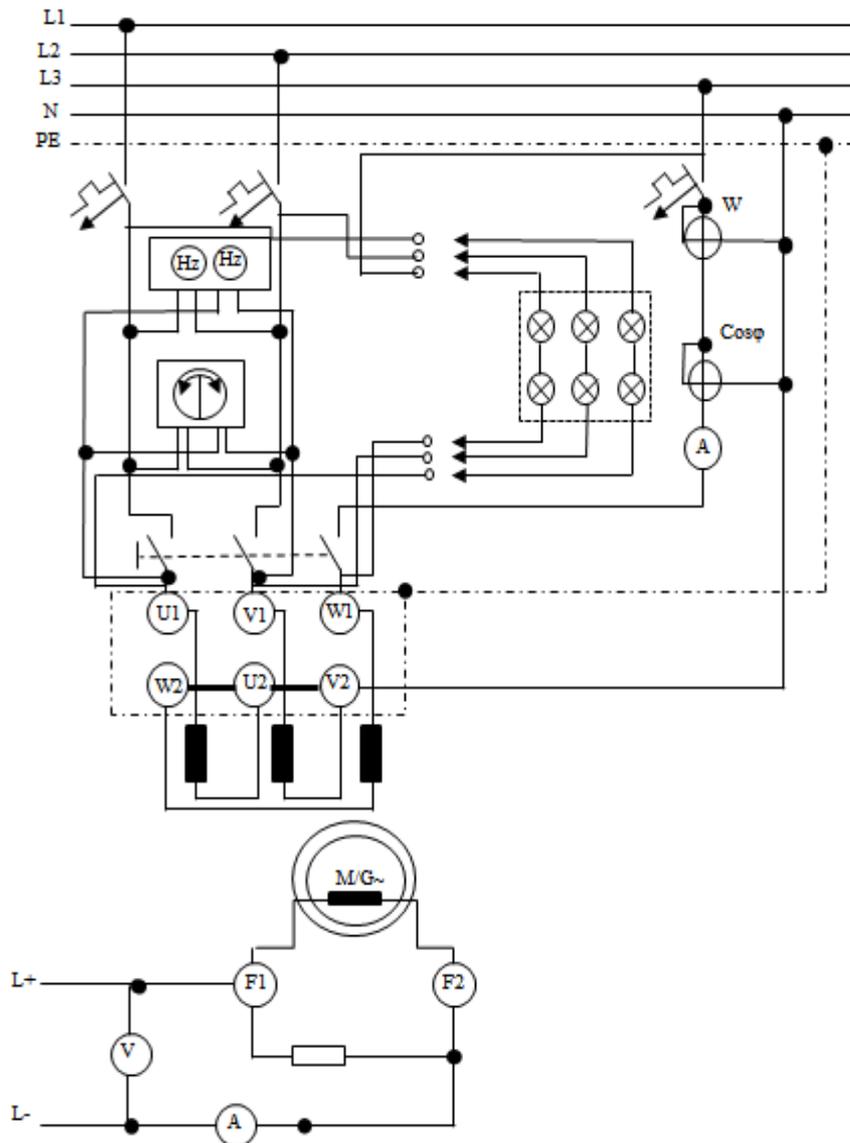


Fig.IV.17 : couplage d'un alternateur au réseau

On met la machine synchrone en marche puis on couple la machine sur le réseau à l'aide du synchronoscope.

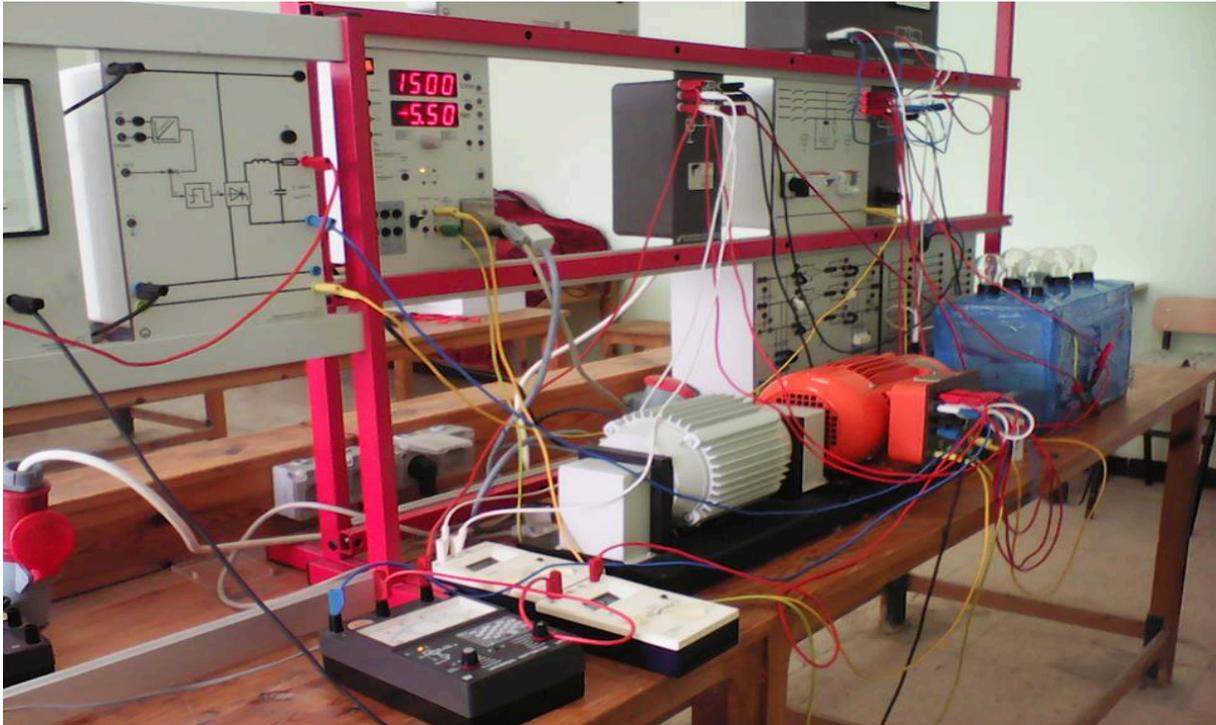


Fig.IV.18 : montage de couplage d'une machine synchrone au réseau

Afin de pouvoir fermer disjoncteur différentielle, il faut que la tension à ses bornes soit nulle. Par cela, il faut donc vérifier l'ordre des phases. Il faut que la tension aux bornes de la machine côté triphasé soit égale à la tension de réseau. Les phases instantanées des tensions statoriques et du réseau doivent être égales.

Vérification de la synchronisation des phases

La vérification est faite par 6 lampes, chaque deux lampes sont raccordées en série.

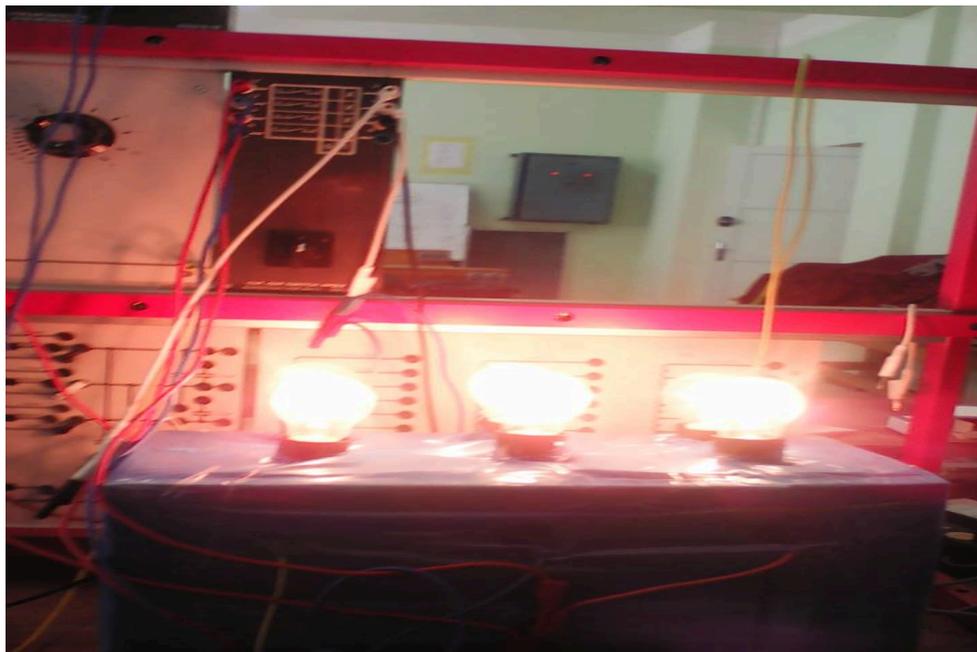


Fig.IV.19 : Vérification de la synchronisation des phases par des six lampes



Fig.IV.20 : synchronoscope

IV.7. Le protocole pour coupler l'alternateur au réseau

- en premier lieu, on a réglé la vitesse de rotation de l'alternateur correspondant à la fréquence du réseau.
- Mettre sous tension l'excitation de l'alternateur puis régler pour ajuster la valeur efficace de l'alternateur tel que $V_{alt} = V_{res}$.
- Vérifier l'ordre de succession des phases. S'il n'est pas bon, mettre hors tension l'excitation de l'alternateur synchrone via un disjoncteur différentiel de 0.6A puis inverser 2 phases sur l'alternateur avant de réaliser à nouveau le réglage précédent.
- par le biais d'un relais de phase on obtient un déphasage nul entre $V_{alt}(t)$ et $V_{res}(t)$.
- Si toutes les conditions sont réalisées, les lampes restent continuellement éteintes : on peut alors fermer l'interrupteur triphasé pour coupler l'alternateur au réseau.

Après la vérification de toutes les conditions pour le couplage, on couple l'alternateur synchrone au réseau.

Les résultats obtenus pour chaque jour d'expérience sont :

$$U_{réseau} = 391-394V \quad I = 1.03A$$

Tableau IV.7 : Résultats de couplage d'une machine synchrone au réseau

	Lundi	Mardi	Mercredi 11/05/2016	
	09/05/2016	10/05/2016	A 11h.30min	A 14h.50min
U(V)	390-393	386-391	397-400	399-404
I(A)	1.02-1.04	0.96-1.02	1.19-1.22	1.10
P(W)	95	140	65	250
Q(VAR)	200	100	55	120
$\cos \phi$	0.80	0.81	0.76	0.9

IV.8. caractéristique de réglage

Afin de procéder facilement au réglage du courant d'excitation de la machine dans des conditions de fonctionnement particulières : par exemple la machine doit fournir 150KVA sous tension nominale alors que la puissance sur l'arbre vaut 58KW.

On construit dans ce but des familles de courbes I_{ex} en fonction de I pour différentes puissances actives et différentes puissances réactives appelées courbes en V ou de Mordey.

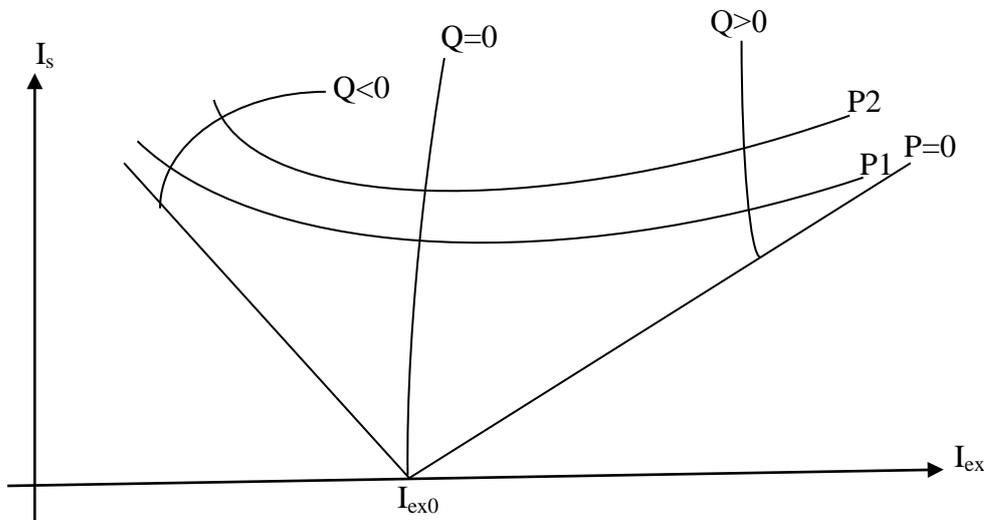


Fig.IV.21 : courbe de Mordey

Le courant d'excitation I_{ex0} correspond au courant d'excitation lors de la procédure de couplage sur le réseau. [45]

IV.9. Augmentation de la puissance active fournie par l'alternateur au réseau

Une fois l'alternateur couplé au réseau, la vitesse de rotation restera fixe car imposée par la fréquence du réseau.

En augmentant la tension d'induit du moteur à courant continu, on ne modifiera donc plus la vitesse. Par contre le courant d'induit et donc le couple, la puissance mécanique fournie à l'alternateur et la puissance active fournie au réseau augmenteront.

IV.10. Diminution de la puissance active fournie par l'alternateur au réseau

La puissance active fournie au réseau peut devenir négative : le sens de l'échange d'énergie est donc inversé.

La machine synchrone ne fonctionne plus en alternateur mais en moteur, la machine à courant continu fonctionne en génératrice à courant continu est renvoie de l'énergie au réseau au travers de son alimentation.

Remarque :

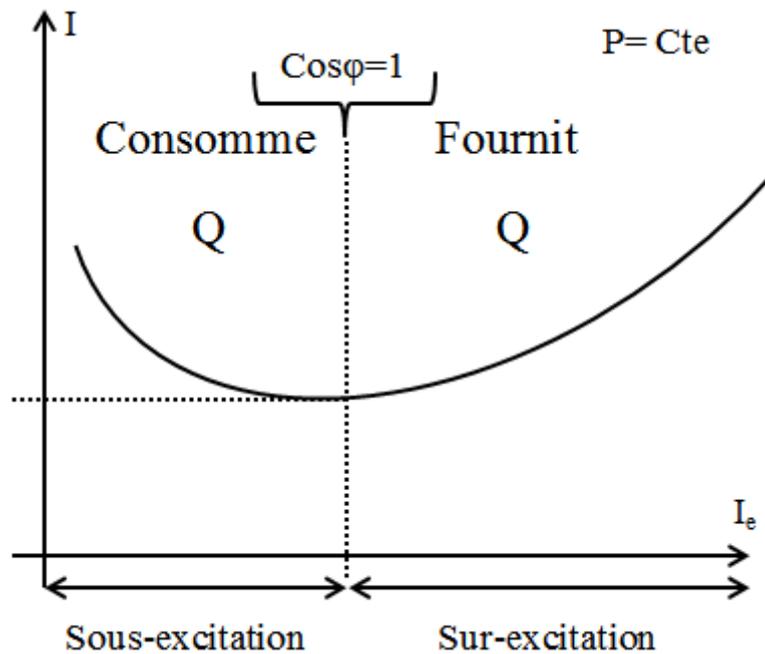
En jouant sur les réglages du dispositif d'entraînement du rotor de l'alternateur, la puissance active fournie par l'alternateur peut devenir négative : la machine synchrone fonctionne alors en moteur synchrone.

IV.11. Le réglage de la puissance réactive fournie au réseau

Une fois l'alternateur couplé au réseau, la valeur efficace de la tension aux bornes de l'alternateur restera fixe car imposée par le réseau. En faisant varier I_e , on ne modifiera plus cette valeur efficace.

La puissance active étant fixée par le dispositif d'entraînement du rotor (MCC), le réglage de I_e ne fera varier que la puissance réactive :

- si l'alternateur est surexcité ($I_e > I_e$ optimum) alors l'alternateur fournit de la puissance réactive (compensateur synchrone).
- si l'alternateur est sous excité ($I_e < I_e$ optimum) alors l'alternateur consomme de la puissance réactive.
- I_e optimum correspond à une puissance réactive nulle ($\cos \varphi = 1$). Le transfert de la puissance s'effectue avec un courant I minimum.

Fig.IV.22 : $I=f(I_e)$ à $P=cste$ (courbe de Mordey)

Remarque : l'alternateur synchrone sous excité risque de décrocher.

IV.11.1 Fonctionnement génératrice

Q est négatif, la machine est en fonctionnement génératrice. La machine est sur-excité, donc on fournit la puissance réactive au réseau.

Q est positif, la machine est fonctionnement génératrice. La machine est sous excitée, donc la machine absorbe de la puissance réactive du réseau.

IV.11.2. Conclusion sur le contrôle des transferts d'énergie réactive

L'intensité d'excitation permet de régler le $\cos\phi$ car il n'agit pas sur la puissance, mais juste sur le courant statorique. Aussi si l'on excite ou sous excite la machine cela permet de faire de la compensation d'énergie réactive. De plus une machine synchrone peut faire de la compensation « analogique ». Par exemple de 0 à 1000 VAR pour une machine de 1000 VAR.

Il s'agit bien entendu de la puissance active. Cette propriété est utilisée dans les compensateurs synchrones. Avec une batterie de condensateurs et des gradins, la compensation se fait par « saut », ici, elle pourrait se faire en « continu ».

IV.12. Le protocole à suivre pour découpler l'alternateur et mettre à l'arrêt le système

- Ouvrir l'interrupteur triphasé (c'est sans danger, le seul risque est d'avoir une survitesse si la tension d'induit du moteur à CC était fortement augmenté).

- Diminuer jusqu'à zéro le courant d'excitation de la machine synchrone et la tension d'induit du moteur à CC.
- Mettre hors tension le circuit d'excitation du moteur à CC.

IV.13. Avantages et inconvénients de couplage

- Avantages

La machine synchrone est plus facile à réaliser.

Son rendement est proche à 99%.

On peut régler son facteur de puissance $\cos\varphi$ en modifiant le courant d'excitation I_e .

- Inconvénients

Un moteur auxiliaire de démarrage est souvent nécessaire. Il faut une excitation, c'est-à-dire une deuxième source d'énergie. Si le couple résistant est dépassé une certaine limite, le moteur décroche et s'arrête. [46]

IV.14. Conclusion

Comportement d l'alternateur fonctionnement isolé raccordé en charge résistive, inductive et capacitive.

Il est impossible de brancher directement une machine synchrone sur le réseau, donc dans cette étude on a expliqué toutes les conditions et les procédures de couplage, Pour faire ce couplage on a établi les égalités des fréquences et les tensions entre le réseau électrique et l'alternateur.

La réalisation de ce travail est effectuée au niveau de laboratoire de réseaux électriques département de génie électrique de Tiaret.

L'objectif est atteint avec un grand succès et le couplage est réalisé.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le travail que nous avons effectué porte sur l'étude de la machine synchrone et de la réalisation du couplage de la machine à induction au réseau électrique 220/380V.

Nous avons effectué également une bonne synthèse bibliographique sur les travaux concernant les machines à induction, Ce qui nous a permis de passer à l'expérimentale.

Dans la première et la deuxième partie du travail, Nous avons présenté en détail la constitution et le principe de fonctionnement du moteur et de l'alternateur synchrone.

Dans la dernière partie du travail Nous avons étudié le comportement de l'alternateur synchrone en fonctionnement isolé au raccordement d'une charge ohmique , inductive et capacitive et pratiquer le couplage de la machine synchrone au reseau .

La possibilité de coupler une machine synchrone est réalisée en tenant compte de la seconde condition de couplage.

nous avons effectuée ces travaux pratiques au sein de le laboratoire de réseau électrique . En utilisant le banc d'essai de la maquette pédagogique.

Les travaux présentés dans ce mémoire ont permis d'exploiter le matériel de laboratoire des réseaux électriques et de réaliser de nouveaux travaux pratiques, afin de les présenter aux étudiants du master.

Perspective d'avenir

La stabilité du couplage étant admise, Il serait aussi intéressant à étudier le problème de la répartition des charges entre les alternateurs.

.

Références Bibliographiques

- [1] F. Z. BENAYED, M. RAHLI et ABDELHAKEM-KORIDAK. « Optimisation du Dispatching Economique par la Méthode d'Harmony Search ». Mediamira Science Publisher Vol 52 N01, pp: 13-17, 2011.
- [2] GUESSAB Hamza, ABDESSELAM Ibrahim analyse et étude du dispatching économique mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme Master de Université Ibn Khaldoun de Tiaret, juin 2015.
- [3] Philippe BARRET Machines électrique Théorie et mise en œuvre, 2002.
- [4] Jean Chatelain, Machines électriques, Presses Polytechniques Romandes, 1983.
- [5] P. Barret, Machines électriques : Théorie et mise en œuvre. Ellipses Editions Marketing S.A, 2002.
- [6] J. Saint-Michel, Bobinage des machines tournantes 'a courant alternatif, Techniques de l'ingénieur, D3420.
- [7] P. Tixador, Les supraconducteurs, HERMES ,1995.
- [8] Philippe Masson, Etude d'écrans supraconducteurs à haute température critique massifs : Application à la réalisation d'une machine électrique de conception originale, PhD Thesis, Université Henry Poincaré Nancy1, 2002.
- [9] Max Marty, Contribution à l'étude de l'échauffement des machines électriques tournantes, PhD Thesis, Faculté des sciences, Université de Toulouse, 1965.
- [10] M. Kostenko and L. Piotrovski, Machines électriques, Techniques Soviétique, 1965.
- [11] Théodore Wildi, Electrotechnique, Deboeck Université, Les entreprises Spérika Ltée, 2000.
- [12] Leroy Somer, LSA 37 2 et 4 pôles shunt, installation et maintenance, 2003.
- [13] JL.Coudert, P.Delsalle, C Dupuis and D Hottois, Constructions mécaniques des machines électriques tournantes, Techniques de l'Ingénieur, D 3780.
- [14] Gilbert Ruelle, Alternateurs hydrauliques et compensateurs, Techniques de l'ingénieur, traité de génie électrique D 3540.
- [15] AIEE Committee Report "Proposed Excitation System Definitions for Synchronous Machines," AIEE Transactions on power apparatus and systems, vol. 80, pp.173-180, 1961.
- [16] IEEE Committee Report "Proposed Excitation System Definitions for Synchronous Machines," IEEE Transactions on power apparatus and systems, vol. PAS-88, n°8, pp. 1248-1258, 1969.
- [17] Annane ADEL MEMOIRE Analyse du comportement du moteur synchrone dans les entraînements électriques à vitesse variable, thase de Magister ,2000.

- [18] L. CHEDOT Contribution à l'étude des machines synchrones à aimants permanents internes à large espace de fonctionnement. Application à l'alternateur Soutenu le 09 novembre 2004 thèse de doctorat.
- [19] Pierre WETZER Machines synchrones Excitation Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique.
- [20] M. OUASSAID EMI 2009/2010 la machine synchrone www.almohandiss.com
- [21] Nicolas BERNARD machine synchrone de la boucle ouverte à l'Autopilotage Ecole Normale Supérieure de Cachan septembre 2002.
- [22] E. Gaucheron Cahier technique n° 207 Les moteurs électriques ... pour mieux les piloter et les protéger.
- [23] Guide de référence sur l'efficacité énergétique de moteurs Ce guide a été préparé par Carl Keyes, Ing., de Kinectrics Inc. pour la Groupe d'intérêt sur les Solutions énergétiques pour les clients (GISEC) de CEA Technologies Inc © 2007 CEA Technologies Inc. Tous droits réservés.
- [24] Patrick ABATI moteur synchrone, 07/09/2001.
- [25] Théodore WILDI, Gilbert SYBILLE 4^e édition 2005.
- [26] Alexandre Perrat Efficacité Energétique des Machines : le choix judicieux de la motorisation Mai 2010.
- [27] J.M Dutertre électrotechnique 1A électronique 2009.
- [28] Lycée P. Mendès France Epinal Cours machine synchrone.
- [29] L'invention du moteur synchrone par Nikola Tesla par Ilarion Pavel ingénieur en chef des mines chercheur au Laboratoire de Physique Théorique École Normale Supérieure.
- [30] Sciences appliquées TS électrotechnique <http://www.etasc.fr/index.php?/accueil>
- [31] Alternateurs hydrauliques et compensateurs. Techniques de l'ingénieur [D 3 540].
- [32] J-C ROLIN G. EIFFEL DIJON Machines électriques alternatives et leur contrôle MACHINE SYNCHRONE MACHINE BRUSHLESS (SYNCHRONE AUTOPILOTE
- [33] Jean-pierre FANTON génie électrique 2003-2004 école centrale paris.
- [34] E.N.S.E.A (Ecole Nationale Supérieure de l'Electricité et des Applications de France) machine synchrone 2009,2010.
- [35] Dr. Ahmed ABBOU ELECTROTECHNIQUE, 2011.
- [36] électrotechnique transformateurs et machines tournantes Dominique Bareille Jean-Pierre Daunis paris 2006.
- [37] Guy Chateigner, Michel Boës, Daniel Bouix, Jacques Vaillant et Daniel Verkindère MANUEL DE GÉNIE ÉLECTRIQUE Tirage corrigé 2007 © Dunod, Paris, 2006 ISBN 978-2-10-

048499-7.

[38] Claude Divoux Terminale STI génie mécanique ©, 2003.

[39] Fabrice Sincère Terminale STI Génie Electrotechnique ©; version 1.0.5.

[40] Théodore wildi avec la collaboration de Gilbert Sybille 3^{ème} édition ELECTROTECHNIQUE 2000.

[41] Laurent ALBERT ingénieur ENSIEG thèse de docteur de L'INPG modélisation et optimisation des alternateurs à griffes application au domaine automobile soutenue le 13 juillet 2013.

[42] Mouad Oubidar et Sedik Bendaoud Machine synchrone/asynchrone PROJET DE FIN D'ETUDE EN INGÉNIERIE DANS LE CADRE DU PROGRAMME EN GÉNIE ÉLECTROMÉCANIQUE 30 Avril 2010.

[43] Amari Mansour cours d'électrotechnique janvier 2014.

[44] Mohamed el euch machines synchrones 2010/2011.

[45] A.KARIM GUEDIRI machines électriques I et II travaux pratiques Septembre 2009.

[46] ZAKI MOUSS couplage des alternateurs aux réseaux, 2009.

Liste des Tableaux

Chapitre I : l'état de l'art des machines synchrones

Tableau I.1 : Classe d'échauffement et isolation des machines électriques.....8

Chapitre III : Alternateur synchrone

Tableau. III.1: relation entre la vitesse de rotation et fréquence.....45

Chapitre IV : Etude Expérimentale sur la machine synchrone

TableauIV.1. : les résultats obtenus pour la tension excitation 40V.....63

TableauIV.2 : les résultats obtenus pour la tension excitation 70V.....63

TableauIV.3. : les résultats obtenus pour la tension excitation 110V.....63

Tableau IV.4 : résultats de la première expérience.....66

Tableau IV.5 : résultat de deuxième expérience.....68

Tableau IV.6 : résultat de troisième expérience.....70

Tableau IV.7 : Résultats de couplage d'une machine synchrone au réseau80

Listes des figures

Chapitre I : l'état de l'art d'une machine synchrone

Fig.I.1 : Machine de Gramme	03
Fig.I.2: Description de la machine synchrone.....	05
Fig.I.3: Bobinage `a pas raccourci : cas d'une machine à 12 encoches au stator ($p=2$).....	06
Fig.I.4: Bobinages repartis réguliers	07
Fig.I.5 : Moteur synchrones à inducteur bobiné.....	07
a)rotor à pole saillants, b) rotor à pole lisses	11
Fig.I.6 : Structure des machines à aimants permanents	13
Fig.I.7 : Machine à réluctance variable laminée axialement.....	14
Fig.I.8: Rotor d'une machine à réluctance variable à double saillance altermo-démarrreur Valeo-LESiR	14
Fig.I.9 : production de champ tournant	16

Chapitre II : moteur synchrone

Fig. II.1: Coupe d'un moteur à aimants permanents	19
Fig.II.1 : moteur industriel à aimants permanents.....	20
Fig.II.2 : rotor de moteur synchrone	20
Fig.II.4 : Excitatrice pour moteur synchrone sans balais	21
Fig.II.5 : Moteur synchrone à rotor non excité	22
Fig.II.6 : schéma de principe de fonctionnement de moteur synchrone	23
Fig. II.7: Modèle équivalent d'une phase.....	23
Fig.II.8 : Schéma montrant le principe de fonctionnement d'une excitatrice sans balais pour moteur synchrone	24
Fig. II.9: Les pôles du rotor sont attirés par les pôles contraires du stator. Lorsque le moteur fonctionne à vide, l'axe des pôles du rotor coïncident avec l'axe central du stator	26

Fig.II.10 : Lorsque le moteur développe un couple, les pôles du rotor se déplacent en arrière des pôles du stator. L'angle α entre l'axe du rotor et l'axe central du stator est une mesure du couple exercé	26
Fig.II.11 : bilan de puissance de moteur	28
Fig.II.12 : Procédure de couplage	31
Fig.II.13 : schéma de principe de moteur autopiloté	33
Fig.II.14 : plan des puissances (AQ,AP)	34
Fig.II.15 : courbe de Mordey	35

Chapitre III : Alternateur synchrone

Fig.III.1: rotor d'alternateur de centrale hydrolique.....	38
Fig.III.2: stator d'alternateur	39
Fig.III.3:Machine à pole lisse.....	39
Fig.III.4:Machine à pole saillant	39
Fig.III.5: Alternateur	40
Fig.III.6: Plaque signalétique	41
Fig. III.7 : modèle de l'induit	41
Fig. III.8 : modèle de l'inducteur	41
Fig. III.9 : diagramme de Fresnel	42
Fig.III.10:Arbe de puissance	42
Fig.III.11: L'alternateur fonctionnant à vide.....	46
Fig.III.12:courbe de variation du f.e.m courant d'excitation I_{ex}	47
Fig.III.13: zone linéaire et zone de saturation de la machine.....	50
Fig.III.14: Essai à vide	50
Fig.III.15 : Essai à court-circuit.....	50
Fig.III.16: Diagramme vectoriel de réaction d'induit de modèle de Potier	53
Fig.III.17: Schéma équivalent par phase d'un alternateur, modèle de Potier	53
Fig.III.18: diagramme vectoriel de réaction d'induit du modèle de Blondel	54
Fig.III.19: Schéma équivalent par phase d'une machine synchrone, modèle de Blondel.....	54
Fig.III.20: Les quatre quadrants de fonctionnement	56
Fig.III.21: Schéma équivalent en court-circuit	56

Fig.III.22 : Caractéristique en charge	57
Fig.III.23 :Caractéristique de réglage.....	57

Chapitre IV : Etude Expérimentale sur la machine synchrone

Fig.IV.1 : schéma de couplage	59
Fig.IV.2 : Courbe de Mordey	61
Fig.IV.3 : un moteur synchrone connecté au réseau	61
Fig.IV.4 : alternateur en fonctionnement isolé	64
Fig.IV.5 : alternateur alimente une charge résistive	66
Fig.IV.6 : Courbe de U1, U2 et I1 en fonctions de la charge résistive	67
Fig.IV.7 : alternateur alimente une charge inductive	67
Fig.VI.8 : charge inductive	68
Fig.IV.9 : courbe de U1, U2 et I1 en fonctions de la charge inductive	68
Fig.IV.10 : alternateur alimente une charge capacitive.....	69
Fig.VI.11 : charge capacitive	69
Fig.IV.12 : courbe de U1, U2 et I1 en fonctions de la charge capacitive	70
Fig.IV.13 : protocole de couplage d'une machine synchrone au réseau.....	71
Fig.IV.14 : l'ordre des phases du système de tensions triphasées	72
Fig.IV.15 : le même ordre des phases.....	74
Fig.IV.16 : l'inverse des ordres des phases.....	74
Fig.IV.17 : couplage d'un alternateur au réseau.....	77
Fig.IV.18 : montage de couplage d'une machine synchrone au réseau	78
Fig.IV.19 : Vérification de la synchronisation des phases par des six lampes.....	78
Fig.IV.20 : synchronoscope.....	79
Fig.IV.21 : courbe de Mordey.....	81
Fig.IV.22 : $I=f(I_e)$ à $P=cste$ (courbe de Mordey).....	82

Listes des Symboles et Acronymes

MS	Machine synchrone
MCC	Machine à courant continu
MAPSB	Les machines à aimants permanents sans balais
MSAP	Les machines synchrones à aimants permanents sans balais
P	Nombre de paire de pôle
n_s	vitesse de rotation du champ tournant en trs.s ⁻¹
F	fréquence des courants alternatifs en Hz
f.e.m	La force électromotrice en volte
Φ	Le flux variable en weber
Ω_s	Vitesse de synchronisme
V	tension aux bornes d'un enroulement de la machine
R	résistance de l'enroulement en ohm
X	réactance synchrone en ohm
H	Rendement en pourcentage
cos φ	Facteur de puissance
Φ	Déphasage entre courant et tension
A	coefficient de Potier
L_q	l'inductance transversale

Résumé

En raison de la demande croissante d'énergie électrique était nécessaire de trouver d'autres sources et de les relier aux réseaux d'électricité.

Ce mémoire vise à utiliser les machines disponibles à l'université, y compris les machines synchrones donc nous étudions ce genre de machines et accompli reliant ces machines du réseau électrique synchrone.

Le but de ce travail est de relier les machines synchrones au réseau électrique à travers la réalisation de toutes les conditions pour faire le travail, puis un lien vers le réseau abondant de certaines exigences qui réduisent le réseau d'énergie électrique.

Abstract

Due to the increasing demand for electric power was necessary to find other sources and link them to the electricity networks.

This memory is designed to use the machines at the university, including synchronous machines so we are studying this kind of machinery and accomplished linking these machines synchronous grid.

The aim of this work is to connect synchronous machines to the grid through the realization of all conditions to do the job, then a link to the abundant network of some requirements that reduce the electrical power network.

الخلاصة

نظرا إلى الطلب المتزايد على الطاقة الكهربائية كان ضروري لإيجاد مصادر أخرى وربطها بشبكات الكهرباء.

تهدف هذه المذكرة إلى استخدام وتفعيل الآلات في الجامعة، بما في ذلك الآلات التزامنية لذلك نحن ندرس هذا النوع من الآلات وإنجاز ربط هذه الآلات التزامنية بالشبكة.

والهدف من هذا العمل هو ربط الآلات التزامنية إلى الشبكة من خلال تحقيق جميع الشروط للقيام بهذه المهمة، ثم توصيلها بالشبكة لتوفير بعض المتطلبات التي تنقص من شبكة الطاقة الكهربائية.